

DLSS- ja FSR-teknologioiden vaikutukset videopelien suorituskykyyn, kuvanlaatuun ja energiankulutukseen

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Tietotekniikka
Kesäkuu 2026
Aki Aho

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

AKI AHO: DLSS- ja FSR-teknologioiden vaikutukset videopelien suorituskykyyn,
kuvanlaatuun ja energiankulutukseen

TkK-tutkielma, 22 s.
Tietotekniikka
Kesäkuu 2026

NVIDIA:n DLSS ja AMD:n FSR ovat ohjelmistopohjaisia ratkaisuja videopelien suorituskyvyn parantamiselle. Teknologioiden päätehtävänä on skaalata pelit alhaisemmasta resoluutiosta korkeampaan resoluutioon. DLSS on hyödyntänyt tekoälyä skaalaukseen jo ensimmäisestä versiosta asti, kun taas FSR on hyödyntänyt tekoälyä vasta FSR 4 -versiossa. Molemmat teknologiat käyttävät skaalauksen lisäksi suorituskyvyn parantamiseen kuvagenerointia, jonka tehtävänä on luoda näytönohjaimen luomien kuvien väliin uusia kuvia. Näiden teknologioiden avulla sekä DLSS että FSR pystyvät jopa moninkertaistamaan kuvataajuuden natiiviin hahmottamiseen verrattuna. Kuvanlaadullisesti teknologioiden välillä on suurempia eroja. DLSS:n todetaan tuottavan FSR:ää paremman kuvanlaadun sekä mielipidepohjaisissa kyselyissä että matemaattisissa/laskennallisissa kokeissa. DLSS todettiin jopa natiivia hahmottamista paremmaksi osassa testeistä. Skaalausteknologioiden käyttö myös vähentää näytönohjaimen energiankulutusta, mutta teknologioista aiheutuva suorituskyvyn parantuminen kasvattaa näytönohjaimen ja prosessorin yhteiskulutusta. Mikäli energiatehokkuutta halutaan parantaa, joudutaan suorituskykyä rajoittamaan. Energiatehokkuutta pystytään parantamaan myös käyttämällä kuvagenerointia. Vaikka FSR:n tapauksessa energiaa kuluu silti hieman enemmän kuin natiivissa, pystytään DLSS:n tapauksessa kuvageneroinnin avulla jopa säästämään energiaa. Tutkimuksesta käy ilmi skaalausteknologioiden vaikuttavan erityisesti suorituskykyyn positiivisesti. Sekä DLSS että FSR parantavat kummatkin pelikokemusta huomattavasti natiiviin nähden. Vaikka teknologioiden suorituskykyjen välillä ei havaita suuria jatkuvia eroja, voidaan DLSS todeta paremmaksi teknologiaksi kuvanlaadun ja energiatehokkuuden kannalta.

Asiasanat: DLSS, FSR, suorituskyky, energiatehokkuus, kuvanlaatu

Sisällys

1	Johdanto	1
2	DLSS- ja FSR-tekniologioiden toimintaperiaatteet	4
2.1	DLSS	4
2.2	FSR	6
3	Kuvanlaatu	8
3.1	Natiivin ja skaalatun hahmontamisen erot	8
3.2	Skaalausteknologioiden kuvanlaadun vertailua	10
4	Suorituskykyanalyysi	13
5	Energiatehokkuus	17
6	Yhteenveto	20
	Lähdeluettelo	23

1 Johdanto

Videopelien grafiikat ovat kehittyneet suuresti viime vuosikymmenten aikana. Ensimmäiset pelit koostuivat vain muutamista pikseleistä, mutta nykyään pelejä pelataan yhä laajemmin jopa 4K-resoluutiolla. Näytönohjainten tekninen kehitys on tähän asti mahdollistanut vaativienkin grafiikoiden suorittamisen natiivilla hahmontamisella (ns. "renderöinti", (engl. *rendering*)). Ensimmäiset näytönohjaimet olivat hyvin yksinkertaisia ja niiden vähäinen suorituskyky riitti yksinkertaisten graafisten ohjelmien suorittamiseen. [1], [2]

NVIDIA sai alkunsa vuonna 1993, jolloin Jensen Huang, Chris Malachowsky ja Curtis Priem loivat yrityksen, jonka tarkoituksena oli tuoda 3D-grafiikat multimediatuotantoon etenkin pelialustoille. Ensimmäinen näytönohjain tuotettiin vasta 1999, jolloin NVIDIAN GeForce 256 julkaistiin. [1] **AMD** perustettiin vuonna 1969, mutta aloitti näytönohjainten valmistuksen vasta 2006 ostettuaan ATI Technologiesin. Ennen tätä AMD:n tuotanto keskittyi etenkin prosessoreihin. [2]

NVIDIA ja AMD ovat jo pitkään kehittäneet ratkaisuja nykyajan pelien suorituskyvyn parantamiselle, mutta skaalaus (engl. *upscale*) -teknologioiden hyödyntäminen videopelien suorituskyvyn parantamiseen aloitettiin vasta vuonna 2018. [3] Tällöin NVIDIA julkaisi uudet RTX 2000 -sarjan näytönohjaimet. Nämä uudet näytönohjaimet pystyvät fyysisen valon simuloimiseen (engl. *raytracing*). Vaikka realistinen valon simulointi sai pelit näyttämään huomattavasti realistisemmilta, aiheutti se suuria haasteita suorituskyvyn kannalta kompleksisuutensa takia. Tähän ratkai-

suna olivat skaalausteknologiat.

Kuvaskaalauksen tehtävänä on suurentaa kuva haluttuun resoluution. Esimerkiksi täysteräväpiirto voidaan suurentaa 4K-laatuun. Tällöin leveys suunnan pikselien määrä kaksinkertaistetaan 1920:stä pikselistä 3840:een pikseliin, ja 1080 korkeus suunnan pikseliä kaksinkertaistetaan 2160:een pikseliin. Yksinkertaisin tapa skaalata kuvaa on toistaa vierekkäiset pikselit. Tätä kutsutaan lähimmän naapurin interpolaatioksi. Yksinkertaisin kehitys tekniikkaan mahdollistetaan bilineaarisella interpolaatiolla, jossa uusien pikselien arvot vastaavat vierekkäisten pikselien keskiarvoa. [4] Uusimmat perinteiset skaalaustekniikat käyttävät skaalaukseen huomattavasti monimutkaisempia algoritmeja ja enemmän dataa, kuten liikevektoreita, matriiseja, useita edellisiä kuvia, sekä reunojen pehmenystä.

Tekoäly on edesauttanut myös skaalausteknologioiden kehitystä. [5] Superresoluutio on laajasti käytetty nimi kuvaamaan tekoälyllä skaalattua kuvaa, joissa käytetään usein konvoluutioneuroverkkoja. Konvoluutioneuroverkkojen tehtävä on simuloida hahmontunnistusta (engl. *pattern recognition*), jossa tietokone oppii tunnistamaan toistuvia muotoja hyödyntäen kerroksittain rakennettuja suodattimia. Tekoäly yhdistää eri tarkkuuksien ja laajuuksien suodattimia, joiden avulla se pystyy ymmärtämään mitä kuvassa on. Tämän datan perusteella se pystyy luomaan entistä tarkempia arvauksia skaalatulle resoluutiolle. [5]

NVIDIA **Deep Learning Super Sampling (DLSS)** ja AMD **FidelityFX Super Resolution (FSR)** eroavat erittäin paljon toimintaperiaatteeltaan. **DLSS** on täysin tekoälyä hyödyntävä teknologia, joka vaatii toimiakseen erillisiä teknologian mahdollistavia osia. [6] **FSR** taas on perinteisesti tehty toimimaan usealla eri alustalla ja käyttämään näytönohjainten laskutehoa kompleksien algoritmien ratkaisemiseen. [7] Uusin FSR 4 -versio vaatii kuitenkin myös erityisiä osia toiminnan mahdollistamiseksi. [8] Teknologioiden yhteisenä tavoitteena on kuitenkin parantaa videopelien kuvanlaatua ja suorituskykyä vähentämällä samalla näytönohjai-

men kuormitusta. Teknologia on uutta ja uusia ratkaisuja sekä kuvanlaadun, että suorituskyvyn parantamiseksi julkaistaan vuosittain.

Tutkielmassa vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

TK1. Miten skaalausteknologiat eroavat toisistaan ja natiivista renderöinnistä?

TK2. Miten DLSS- ja FSR-teknologiat vaikuttavat kuvanlaatuun ja suorituskykyyn?

TK3. Miten skaalausteknologioiden käyttö vaikuttaa energiankulutukseen?

Lähteitä etsittiin käyttämällä hakulausetta (**(”DLSS” OR ”Deep Learning Super Sampling”) OR ”FidelityFX Super Resolution”) AND (performance OR ”power consumption” OR ”energy consumption” OR ”energy efficiency” OR ”image quality” OR ”frame rate”)**). Hakulauseen avulla valittiin 9 tutkimusta, joista lopulta käytettiin kahta. Näihin lähteisiin lisättiin täydentäviä tieteellisiä tutkimuksia, sekä NVIDIAN ja AMD:n julkaisemia artikkeleita. Tämän lisäksi etenkin vertailun avustamiseen käytettiin tiedelehtien julkaisemia artikkeleita.

Tutkielmassa tarkastellaan etenkin NVIDIAN DLSS 3.0:aa ja sitä uudempia versioita. AMD:n FSR:stä tutkitaan versioita 2.0 ja sen jälkeen julkaistuja versioita.

Tutkielma koostuu kuudesta eri luvusta. Luvussa 2 esitellään tarkemmin teknologioiden toimintaperiaatteita ja toiminnan eroja. Samalla tutkitaan tarkemmin, miten DLSS ja FSR -teknologioiden käytöstä on hyötyä. Luvussa 3 tutkitaan kuvanlaadun eroja natiiviin renderöintiin verrattuna, sekä tarkastellaan DLSS:n ja FSR:n kuvanlaadullisia eroja. Luvussa 4 tarkastellaan eroja natiivin ja skaalatun suorituskyvyn välillä. Samalla tutkitaan miten teknologiat mahdollistavat suorituskyvyn kasvatuksen. Luvussa 5 tarkastellaan ja pohditaan teknologioiden käytön hyötyjä ja haittoja energiatehokkuuden kannalta. Luvussa 6 kootaan johtopäätös tutkimuksen perusteella ja pohditaan, miten teknologioita olisi paras käyttää ja kehittää.

2 DLSS- ja FSR-teknologioiden toimintaperiaatteet

Nykyaikaiset pelit vaativat valtavan määrän suoritustehoa. Säteenseuranta ja nopealiikkeiset sekä yksityiskohtaiset pelit vaativat sekä tarkan, että suorituskyvyltään tasaisen pelikokemuksen. Käyttämällä DLSS- tai FSR -teknologioita voimme vähentää näytönohjaimen kuormitusta. Tällöin näytönohjaimen ei tarvitse toimia täydellä teholla, vaan on mahdollista käyttää teho muihin tehtäviin. Vähäisempi kuormitus kasvattaa myös laitteiston käyttöikä.

2.1 DLSS

NVIDIA aloitti videopelien skaalausteknologioiden kehityksen 2018 julkaisemalla uusilla RTX 2000 -sarjan näytönohjaimilla toimivan DLSS-skaalausteknologian. CUDA-ydin on NVIDIAN näytönohjaimessa oleva prosessointiyksikkö, joka työstää grafiikoita sekä rinnakkaislaskentaa. CUDA on ohjelmointikieli, joka mahdollistaa tämän. [9] RTX-sarjan näytönohjaimille lisättiin myös RT-ytimet ja Tensor-ytimet. RT-ydinten tehtävä on mahdollistaa säteenseurantaan vaadittu laskentateho. Tensor-ytimet on luotu tekoälyä hyödyntävien ohjelmien laskuja varten. Tensor-ytimet ovat kehitetty tehostamaan syväoppimista ja suorittamaan matriisilaskentaa, kun taas CUDA-ytimet ovat yleiseen käyttöön luotuja yksinkertaisempia laskuja tekeviä ytimiä. Nämä teknologian osat mahdollistavat DLSS:n toiminnan.

DLSS:n avulla pelit voidaan renderöidä pienemmällä resoluutiolla, joka korotetaan suurempaan resoluutioon hyödyntämällä peliin koulutettua tekoälyä. Ensimmäiset mallit toimivat vain pelikohtaisesti, sillä jokaiselle pelille täytyi kouluttaa erillinen tekoälymalli. [3] Nykyään tekoäly pystytään kouluttamaan yleisellä tasolla, jonka ansiosta DLSS -teknologia on helpompi toteuttaa uusiin peleihin. DLSS-malli koulutetaan valmiiksi renderöityjä kuvia ja välivaiheen puskureita (engl. *intermediate buffers*) käyttäen. Malli tarkastelee huonolaatuisia kuvia ja luo sen perusteella korkeampilaatuisia kuvia, joita verrataan supertietokoneen muodostamiin täydellisiin kuviin. Täydellisillä kuvilla tarkoitetaan referenssikuvia, joita supertietokone on esikäsitellyt. [3], [10]

DLSS 3 mahdollisti kuvageneroinnin (engl. *frame generation*) ja paransi kuvanlaatua hyödyntämällä uutta mikroarkkitehtuuria. Uusi versio hyödyntää tämänhetkistä ja edellistä luotua kuvaa, sekä optista vuokenttää (engl. *optical flow field*) ja muuta pelidataa kuten vektoreita. Näiden avulla DLSS pystyy luomaan itsenäisesti täysin uuden kuvan näytönohjaimen luomasta kuvasta käytännössä kaksinkertaisten kuvataajuuden (engl. *frames per second*, FPS). [5] Kuvataajuus kertoo kuinka monta kuvaa tietokone näyttää sekunnissa.

DLSS 4 kehittää etenkin kuvagenerointiteknologiaa entisestään. Malli tuottaa jopa kolme kuvaa yhdestä näytönohjaimen luomasta kuvasta. Tämä tarkoittaa, että kuvataajuus voidaan periaatteessa jopa nelinkertaistaa. Tämä mahdollistettiin muun muassa jakamalla arkkitehtuuri kahteen osaan, jotka voivat toimia rinnakkain. DLSS 4:n myötä myös säteenkokoaminen (engl. *ray reconstruction*) kehittyi. Perinteisesti valon toimintaa on jouduttu simuloimaan huonommalla resoluutiolla, jonka seurauksena lopullinen tuote on näyttänyt epäselvältä. Uutta transformer-pohjaista neuroverkkoa hyödyntämällä voidaan simulointia tehdä myös suuremman resoluution kuvissa ilman, että suorituskyky kärsii. Transformerit kykenevät paremmin mallintamaan monimutkaisia tilallisia ja ajallisia suhteita. Tämän ansiosta

DLSS 4 kykenee tarkastelemaan kuvia laajemmin ja luomaan sen avulla parempilaatuisia kuvia. Malli parantaa myös yksityiskohtien säilymistä ja vähentää artefakteja. [6]

2.2 FSR

FSR julkaistiin vuonna 2021. [11] FSR on avoimella lähdekoodilla rakennettu skaalausteknologia, joka käytti perinteisiä skaalaustekniikoita ja algoritmeja. AMD:n prosessointiyksiköitä kutsutaan Stream-prosessoreiksi, ja ne mahdollistavat suurimman osan AMD:n näytönohjainten laskentatehosta. Yhteen AMD:n laskentayksiköön mahtuu 64 Stream-prosessoria. AMD mahdollistaa säteenseurannan säteenkiihdyttimillä (engl. *ray accelerator*). Säteenkiihdyttimet suorittavat suurimman osan vaaditusta säteenseurannan laskelmasta. [12] Koska FSR:n alkuperäiset versiot eivät vaadi erillisiä teknisiä komponentteja, se toimii lähes kaikilla nykyaikaisilla näytönohjaimilla.

Ensimmäinen FSR -malli koostui kahdesta osasta, jotka ovat EASU (Edge-Adaptive Spatial Upsampling) ja RCAS (Robust Contrast-Adaptive Sharpening). EASU:n tehtävä oli skaalata näytönohjaimen tuottamasta yksittäisestä kuvasta näytölle heijastettava versio. RCAS terävöittää EASU:n luoman kuvan ja lopullinen kuva heijastetaan näytölle. Käsikirjoitettu algoritmi analysoi vierekkäisten pikselien kirkkauksia ja luo niiden perusteella skaalatun kuvan. [11]

Uudemmat versiot käyttävät skaalauksessa näytönohjaimen luoman kuvan lisäksi ajallista tietoa, kuten vektoreita ja kuvahistoriaa. EASU:n käyttö siis lopetettiin, koska sen avulla ei ole mahdollista hyödyntää skaalauksessa muuta kuin yhtä näytönohjaimen tuottamaa kuvaa. Uusi teknologia paransi huomattavasti FSR:n kuvanlaatua etenkin liikkuvissa kuvissa, sillä se pystyy ajallista tietoa hyödyntämällä arvioimaan huomattavasti paremmin skaalatun kuvan. [13]

FSR 3 mahdollisti kuvageneroinnin. Tämä onnistuu uusien kuvainterpolatio

(engl. *Frame Interpolation*) ja optinenvirtaus (engl. *Optical Flow*) -teknologioiden avulla. Ne kykenevät luomaan täysin uuden kuvan analysoimalla muita näyttöohjaimen luomia kuvia. [7] Myöhemmin julkaistiin myös AMD Fluid Motion Frames (AFMF), joka on AMD:n näyttöohjaimilla toimiva kuvagenerointiteknologia, joka ei vaadi erillistä implementaatiota peleihin.

FSR 4:stä tuli osa suurempaa FSR Redstone -projektia, joka liittyy koneoppimisen osaksi FSR -teknologiaa. Redstone on toistaiseksi saatavilla vain uusimmilla RX 9000 -sarjan näyttöohjaimilla, jotka käyttävät uutta RDNA 4 -mikroarkkitehtuuria, joka sisältää erillisiä AI-kiihdyttimiä (engl. *AI Accelerator*). [8], [12] Näiden avulla AMD pyrkii kasvattamaan FSR:n laatua ja tekemään siitä entistä kilpailukykyisemmän NVIDIA:n DLSS:n kanssa.

3 Kuvanlaatu

Yksi skaalausteknologioiden tavoitteista on luoda käyttäjälle mahdollisimman hyvä katselukokemus. Natiivin kuvanlaadun vertaiseen kuvaan on vaikea päästä etenkin videopeleissä johtuen nopeasti muuttuvista kuvista ja suuresta kuvataajuudesta. Luvussa 3.1 pohditaan natiivin ja skaalatun kuvan kuvanlaadullisia hyötyjä sekä haittoja. Luvussa 3.2 keskitytään DLSS ja FSR -teknologioiden vertailuun käyttäen kuvanlaadun tarkasteluun luotuja matemaattisia/laskennallisia kaavoja, sekä käyttäjien mielipiteisiin pohjautuvaa testiä.

3.1 Natiivin ja skaalatun hahmontamisen erot

Natiivin renderöinnin etuna on sen kyky renderöidä jokainen pikseli. Natiivia renderöintiä käytettäessä värit, artefaktit ja etenkin kuvan terävyys saadaan pidettyä parhaissa mahdollisissa arvoissa. Natiivi renderöinti luo siis näyttöön nähden täydellisen määrän pikseleitä, jonka ansiosta kuva heijastetaan varmasti maksimaalisella terävyydellä. Samalla varmistetaan, ettei kuvaan synny muita artefakteja tai interpolaatiovirheitä. Natiivin resoluution ongelmana on kuitenkin etenkin pienet yksityiskohdat, joissa yksittäiset pikselit eivät kykene kuvaamaan pintoja tarkasti. Tästä johtuen peleissä voi silti esiintyä pienten pintojen katoamista ja rosoisia reunoja, joita skaalausteknologiat kykenevät korjaamaan.

Etenkin alhaista resoluutiota skaalatessa tavalliset algoritmit kärsivät kun tarkastellaan yksityiskohtia. Kun alkuperäisessä kuvassa on vain vähän pikseleitä, jou-

tuvat skaalausteknologiat tekemään epätarkempia veikkauksia vähäisestä informaatiosta johtuen. Tämän takia kuvat voivat olla usein palikkamaisia, sumeita tai epätarkkoja. [4], [14] Tekoälymenetelmät ja myös FSR:n käyttämä optinen vuokenttä pystyvät usein parempiin tuloksiin, joka johtuu muun muassa tarkemmista veikkauksista ja laajemmasta vertailudatasta. Tekoälyä hyödyntävät teknologiat kykenevät myös luomaan yksityiskohtia, joita alkuperäisestä kuvasta ei oltaisi voitu kerätä.

Artefaktit ovat suuri ongelma etenkin tarkasteltaessa kuvia, joissa on paljon liikettä. Kun joudutaan analysoimaan jatkuvia usein ennalta-arvaamattomia liikkeitä, on perinteisten metodien vaikea luoda jatkuvasti tarkkoja arvauksia. Tästä johtuen kuviin syntyy haamuefektejä (engl. *ghosting*), joissa epätarkkoja kopioita kuvasta ilmestyy liikkuvan kuvan taakse. [14], [15] Kuvissa on myös mahdollista näkyä välkyntää (engl. *flickering*), joka johtuu esimerkiksi värin, kirkkauden tai terävyyden eroista yksittäisten kuvien välillä. [14]

Skaalaustekniikoilla on kuitenkin myös etuja. Koska kuvia voidaan käsitellä erikseen ja kuvan luomiseen voidaan käyttää suurta määrää metadataa, pystytään esimerkiksi rosoisia pintoja ja pienten pintojen katoamista korjaamaan skaalausta käsiteltäessä. Tekoälyä hyödyntävät toteutukset kuten konvoluutioneuroverkot pystyvät itse korjaamaan virheellisiä tai vajaita pikselitietoja. [14] AAA-pelejä lukuunottamatta skaalaustekniikoita tukee yhä vain pieni osa peleistä ja vain harvat pelit ovat riittävän visuaalisesti rasittavia oikeuttaakseen skaalausteknologioiden käytön. Skaalausteknologioiden käytön hyöty onkin usein käyttäjäkohtaista etenkin alhaisella resoluutiolla pelatessa. Teknologioiden hyödyntäminen myös mutkistaa renderöintiä ja uudemmissa versioissa laitteiston suunnittelua muun muassa ylimääräisten tekoälyydinten vuoksi.

3.2 Skaalausteknologioiden kuvanlaadun vertailua

Kuvanlaadun vertailuun on kehitetty monia toisistaan eroavia menetelmiä. Kuvanlaadua voidaan verrata kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on käyttäjän silmämääräisesti tekemien arvioiden pohjalta, jolloin vertailuun voivat vaikuttaa myös käyttäjäkohtaiset mieltymykset. Toinen lähestymistapa on hyödyntää tutkijoiden käyttämiä matemaattisia/laskennallisia menetelmiä.

Teknologialehti ComputerBasen teettämässä testissä pyydettiin lukijoita arvioimaan parhaan laatuinen UHD resoluutioinen otos videopelistä. Testi suoritettiin kuudessa eri pelissä. Lukijoille esiteltiin kohtaaus videopelistä, joka oli leikattu kolmeen alueeseen. Yhdellä alueella näytettiin natiivisti tuotettu video, toisella DLSS:n ja kolmannella FSR:n tuottama video. Lukijalle ei kerrottu mikä alueista oli mitään teknologiaa hyödyntävä. Lukijan tehtävänä oli valita parhaan näköinen alue tai valita vaihtoehto, joka totesi kaikkien alueiden näyttävän samalta. Testi kesti viikon ja jokaisen pelin arviointiin osallistui yli tuhat ihmistä. Yhteensä ääniä oli 6747. [16]

Testin tulokset osoittivat NVIDIA DLSS:n tuottavan ylivoimaisesti parhaimman kuvanlaadun testiin osallistujien mielestä. Kaikkiaan DLSS keräsi 48,2 % äänistä, eli lähes puolet kaikista äänistä. Natiivi kuvanlaatu sai 24 % äänistä ja FSR vain 15 % äänistä. Samannäköiseksi äänestettyjä oli loput 12,8 %. FSR:n saamat äänet ylittivät siis vain juuri samannäköisten alueiden saamat äänet. Kyselyn mukaan DLSS on siis 2026 alkuvuoden paras vaihtoehto. Testi kertoo kuitenkin vain parhaan näköisen kuvan tuottavan teknologian, eikä esimerkiksi tiedetä mikä testien toiseksi paras kuvanlaatu olisi ollut. [17]

Kuvanlaadun vertailuun on kehitetty teknologioita jo 1900-luvulla, kun kuvien digitalisointi sai alkunsa. **Keskineliövirhe** (engl. *Mean Square Error*, **MSE**) sekä **huippusignaali-kohinasuhde** (engl. *Peak Signal to Noise Ratio*, **PSNR**) ovat olleet jo 1900-luvun loppupuolelta asti käytettyjä menetelmiä kuvanlaadun vertailuun. 2000-luvun alkupuolella esitetty **rakenteellisen samanlaisuuden indeksi** (*Struc-*

tural Similarity Index Measure, SSIM) on uudempi menetelmä, jonka tarkoituksena on arvioida ihmissilmällä helpommin erottavia virheitä. [18]

MSE:ssä lasketaan kuvanlaadun virheiden neliön keskiarvo. Tästä saadaan MSE-arvo, jossa lähempänä nollaa olevat arvot ovat paremmat. PSNR:ssä kuvaa tarkastellaan signaalina. Maksimaalisen pikseliarvon ja MSE:n jakolasku kerrotaan kymmenellä ja kymmenkantaisella logaritmilla. Maksimaalinen pikseliarvo saadaan kuvan biteistä, ja esimerkiksi 8-bittisen kuvan maksimaalinen pikseliarvo on 255. [18] Suuret yksittäiset virheet voivat huonontaa PSNR- ja MSE-arvoja huomattavasti, vaikka niistä ei olisikaan ihmisen näkemässä kokonaisuudessa haittaa. Tämän vuoksi SSIM:ää käytetään usein PSNR- ja MSE-arvojen kanssa. [19]

SSIM on havaintoihin perustuva metodi. Siinä ei verrata yksittäisiä pikseleitä vaan laajempia kokonaisuuksia. SSIM:ssä tarkastellaan rakenteellisen informaation muutoksia ja siinä hyödynnetään usein myös havaintoihin perustuvia maskeja. [18], [19]

Shubhojit Sen ja Bharat Bhushan vertailivat tutkimuksessaan DLSS:n ja FSR:n kuvanlaadullisia eroja käyttäen esiteltyjä kuvanlaadun mittareita. [19] Tutkimuksessa käytettiin DLSS:n versiota 3.1, FSR:n versiota 2.1 ja 0-prosenttista terävyyttä sekä suorituskykytilaa. Vertailukohteena molemmille teknologioille käytettiin natiiivia resoluutiota. Kuvat analysoitiin Pythonia ja sen kirjastoja, sekä työkaluja hyödyntäen. Vertailtavista kuvista lasketaan MSE-, PSNR- ja SSIM-arvot. Näiden lisäksi käytettiin MS-SSIM-menetelmää, jossa SSIM:ään lisätään yhdistelmä korkeimman resoluution luminanssi-informaatiosta sekä alempien resoluutioiden rakenne- ja kontrasti-informaatiota. [19]

Tuloksista nähdään DLSS:n saavan FSR:ää paremmat arvot sekä MSE-, että PSNR-arvoja tarkasteltaessa. FSR:n PSNR-arvo tuottaa keskimäärin noin 0.37 desibeliä suuremman häiriön. Raakadataa käsiteltäessä DLSS on siis tutkimuksen mukaan parempi skaalausteknologia. SSIM-tutkimus ja MS-SSIM-tutkimukset myös to-

distavat DLSS:n tuottavan ihmisen havainnoinnille natiivia enemmän muistuttavan kuvanlaadun. Tässä mittarissa DLSS oli keskimäärin 1.5 prosenttiyksikköä parempi kuin FSR SSIM-arvoja tarkasteltaessa, ja MS-SSIM-arvoja tarkastellessa keskimäärin 0.28 prosenttiyksikkö parempi. [19]

Testeistä nähdään DLSS:n olevan kuvanlaadullisesti FSR:ää parempi. Senin ja Bhushanin tutkimuksessa käytetyissä kuvissa ei otettu huomioon liikkeen aiheuttamia artefakteja. [19] Aikaisemmista tutkimuksista näemme kuitenkin, että FSR:n hyödyntämät teknologiat tuottavat artefakteja DLSS:n käyttämää tekoälyteknologiaa todennäköisemmin. [14] Tämän perusteella todellisessa pelikokemuksessa DLSS voisi mahdollistaa vielä suuremman edun FSR:ää vastaan. ComputerBasen tuottama kysely myös tukee tätä oletusta. [17]

4 Suorituskykyanalyysi

Skaalausteknologioiden päätavoitteena on tuottaa suorituskyvyltään mahdollisimman hyvä pelikokemus. Näytönohjaimelle on huomattavasti helpompaa tuottaa alemman resoluution kuvia, koska pienemmän resoluution kuvissa pikselimäärä on vähäisempi.

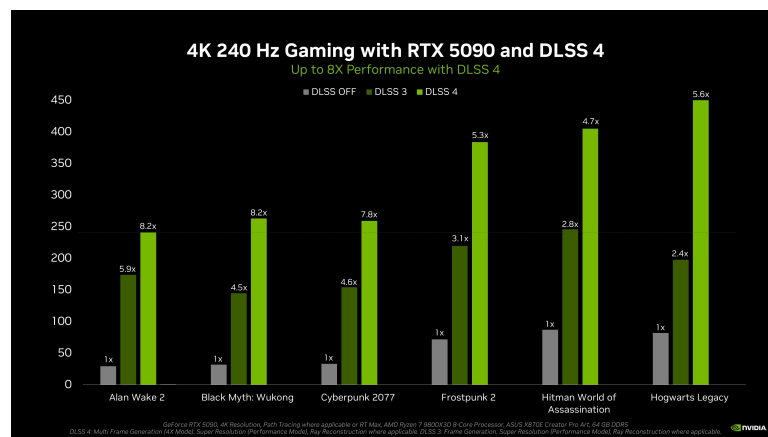
DLSS 3 -version julkaisu oli suuri edistys skaalausteknologioiden suorituskykyä ajatellen. Jatkuvasti kehittyvä ja koulutettu tekoälymalli paransi suorituskykyä entisestään. Kuvagenerointi on selvästi tärkein lisäys suorituskyvyn kannalta, mutta uudet teknologiat kuten NVIDIA Reflex parantavat myös omilta osin pelikokemusta. Reflexin tehtävä on vähentää vasteaikaa ja viivettä. Teknologia oli erityisen tärkeä kuvageneroinnin kehityksen mahdollistamiseen. [5], [6] Kun luodaan yhdestä kuvasta kaksi kuvaa, joudutaan odottamaan yhden ylimääräisen kuvan verran, jotta syöte saadaan välitettyä ohjelmistolle. Myös AMD lisäsi myöhemmin FSR 3 -versiossa oman versionsa kuvageneroinnista, joka toimi perinteisin menetelmin hyödyntäen optista vuokenttää ja algoritmeja liikkeenarviointiin. [7] FSR 4 -versiossa kuvagenerointi työstetään jo myös tekoälyä hyödyntäen. [8] Kuvageneroinnin tulevaisuus näyttää olevan tekoälyn mahdollistama.

Suorituskykyä käsiteltäessä skaalausteknologioiden suurimmat edut saadaan pienemmän resoluution kuvan tuottamisesta. Näytönohjain pystyy toimimaan huomattavasti alhaisemmalla teholla etenkin, kun skaalataan 1080p:n resoluutiosta 1440p- ja 4K-resoluutioihin, sillä luotavien pikselien määrä on alhaisemmassa resoluutios-

sa pienempi. Tämä vähentää sekä näytönohjaimen virrankulutusta, lämpötilaa, että käyttöä.

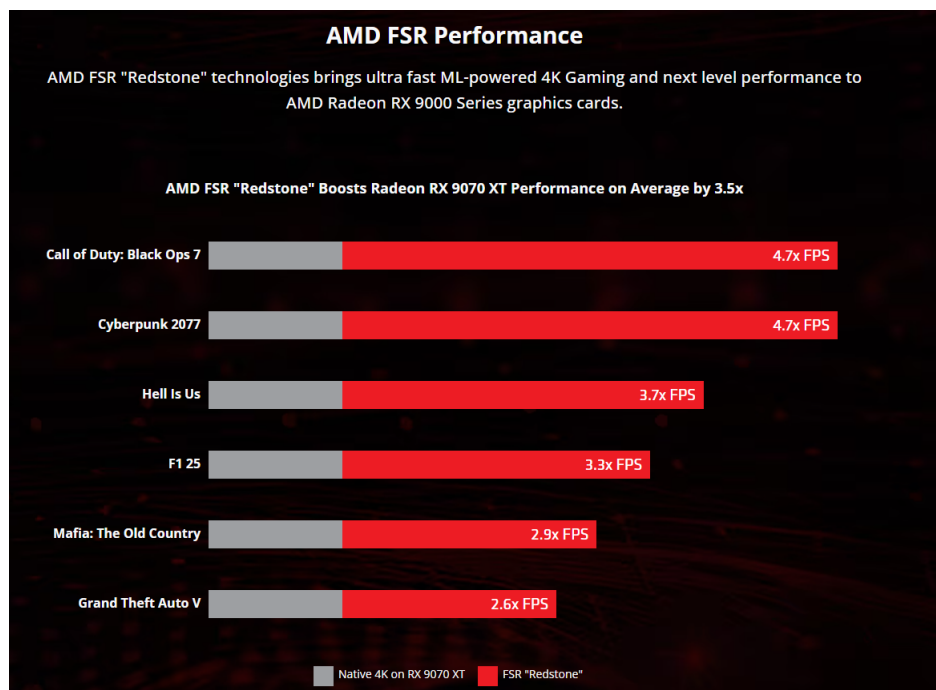
Kuvagenerointi on teknologia joka pystyy todelliseen kuvataajuuden moninkertaistamiseen. [6], [8] Se voi myös vähentää prosessorin pullonkaulojen vaikutusta, sillä tekoälykuvat työstetään täysin näytönohjaimella. Teknologian ongelmana oli alussa etenkin liikkumisesta aiheutuvat artefaktit. Toinen suuri ongelma on viive. Generoituihin kuviin ei voida lisätä käyttäjän tekemiä liikkeitä. Viiveen minimointi on tärkeää etenkin nopeatempoisissa peleissä, joten kuvagenerointi ei ainakaan vielä ole kaikkiin peleihin sopiva teknologia. Teknologian kehityksen myötä haittapuolet ovat kuitenkin vähentyneet huomattavasti. [20]

NVIDIA:n julkaisemassa kaaviossa (Kuva 4.1) vertaillaan 4K-pelien suorituskykyjen eroja peleissä, jotka tukevat DLSS-teknologiaa. Kuvasta nähdään, että ainoastaan DLSS 4 pystyy tuottamaan riittävästi kuvia, jotta näytön virkistystaajuus pystyy toimimaan täydellä teholla. Huomataan myös, että natiivi renderöinti ei kykene jokaisessa pelissä edes ylittämään 60:tä kuvaa sekunnissa, minkä katsotaan olevan kuvataajuuden vähimmäisvaatimus sujuvalle pelikokemukselle. Kuvataajuuden kasvu vaihtelee 4.7- ja 8.2-kertaisen suorituskyvyn paranemisen välillä. Kuvasta huomataan, kuinka suuri etu teknologian käytöllä on suorituskykyä ajatellen nykyajan peleissä. [6]



Kuva 4.1: Kuvassa natiivin ja DLSS 3-, sekä DLSS 4 -versioiden kuvataajuuksia [6]

Kuvassa 4.2 esitetään AMD:n julkaisema kaavio FSR-teknologioiden tehokkuudesta. Kuvassa ei kerrota todellisia suorituskyvyn arvoja, joten on vaikea arvata todellista hyötyä. *Grand Theft Auto V* vaatii huomattavasti vähemmän tehoja kuin esimerkiksi *Cyberpunk 2077*, jonka seurauksena *GTA V* voi hyvinkin tuottaa todellisuudessa korkeamman kuvataajuuden, vaikka hyöty ei olekaan kuvan taulukossa yhtä suuri. [8]



Kuva 4.2: Kuvassa FSR 4 -version vaikutus suorituskyvylle [8]

DLSS:n ja FSR:n välinen kilpailu on ollut jo pitkään tutkittua ja seurattua. FSR:n katsotaan pitkään olleen DLSS:ää jahtaava tuote. Tämä johtuu DLSS:n lähes kolmen vuoden etumatkasta. DLSS:ää ollaan myös jo pitkään pidetty kehittyneempänä ja parempia tuloksia tuovana ratkaisuna, mutta etenkin viime vuosina AMD on tehnyt todellisia parannuksia FSR:ään. [21], [19] Teknologia-alan uutisvustot ovat vuosien aikana julkaisseet monia artikkeleita, joissa verrataan DLSS:n ja FSR:n suorituskykyä. Etenkin TechPowerUp:iin on julkaistu pelikohtaisia vertailuja trendikkäiden pelien suorituskyvyistä eri skaalausteknologiaa hyödyntäen. [22], [23],

[24], [25], [26] Taulukossa 4.1 tarkastellaan eri pelien kuvataajuutta 4K- resoluutiolla hyödyntäen DLSS:n ja FSR:n laatuasetuksia, sekä kuvagenerointia (FG).

Taulukko 4.1: Kuvataajuusvertailu eri skaalausteknologioiden välillä.

	Versiot	Natiivi	DLSS	DLSS + FG	FSR	FSR + FG
Hogwarts Legacy [22]	DLSS 3 FSR 2.1	42	56	83	57	X
Lords of the Fallen [23]	DLSS 3.1 FSR 2.2	40	68	94	64	X
Alan Wake 2 [24]	DLSS 3.5 FSR 2.2	25	44	69	45	X
God of War Ragnarök [25]	DLSS 3.7 FSR 3.1	68	90	116	89	131
S.T.A.L.K.E.R 2 [26]	DLSS 3.7 FSR 3.1	44	67	88	64	86

Taulukosta huomataan, kuinka tärkeitä skaalausteknologiat ovat suorituskyvyn kannalta. Ainoastaan *God of War Ragnarök* tuotti riittävän hyvän kuvataajuuden natiivilla renderöinnillä ja *Alan Wake 2*, sekä *Hogwarts Legacy* tarvitsivat kuvagenerointiteknologian ylittääkseen 60 kuvaa sekunnissa. Huomataan myös kuinka lähellä teknologiat ovat toisiaan suorituskykyä tarkasteltaessa. Pelistä riippuen kuvataajuuden ero oli vain muutaman kuvan sekunnissa. Techspotin julkaisemassa artikkelissa huomataan tasavertaisuus myös uudemmissa DLSS 4.5, sekä FSR 4 -versioissa. [21] DLSS:n ja FSR:n suorituskykyjen kasvu vaihteli muutaman prosenttiyksikön välillä. Testistä myös huomataan, että uudempi DLSS 4.5 tuottaa vanhempaa DLSS 4 -versiota huomomman suorituskyvyn kasvun, joka johtuu raskaammasta graafisesta työstämisestä. [21]

5 Energiatehokkuus

Energiatehokkuus on noussut viime vuosina keskusteluihin etenkin tekoälyn ja tietokoneiden jatkuvasti kasvavan energiatarpeen myötä. Strubell ym. kertovat Googlen BERT-mallin kuluttaneen jopa 1507kWh nelipäiväisen koulutuksensa aikana. [27] NVIDIA ja AMD eivät ole julkaisseet tietoja liittyen DLSS:n ja FSR:n tekoälykoulutuksen kuluttamaan energiaan. Esimerkiksi openAI:n chatGPT:n ollaan arvioitu käyttävän jopa 564MWh päivässä. [28] Voidaan arvata DLSS:n ja uusimman FSR:n kuluttavan myös suuren määrän energiaa.

Myös itse videopelien pelaaminen kuluttaa paljon energiaa. Evan Mills ym. arvioivat tietokonepelaamisen kuluttavan Yhdysvalloissa jopa 34TWh/vuosi. Tämä oli 2.4 % koko Yhdysvaltojen asukkaiden kuluttamasta energiasta. [29] Tietokoneita vertailtaessa onkin tärkeää myös tarkastella energiategokkuutta pelkän suorituskyvyn ja laadun lisäksi.

Näytönohjaimet ovat tietokoneista eniten energiaa vaativat osat. Evan Mills ym. kertovat näytönohjainten kuluttavan jopa 77 % energiasta kuormituksen alla. [29] Vuosien kuluessa tietokoneiden teho on kasvanut ja sen seurauksena myös komponenttien energiankulutus.

Mikael Berg tutkii skaalaamisen ja kuvageneroinnin energiavaikutuksia peleihin. Tutkimuksessa vertaillaan DLSS-, FSR- ja XeSS-tekniologioiden vaikutusta energiankulutukseen. Analyysissä keskityn DLSS-, sekä FSR-tekniologioihin. Tutkimuksessa tarkastellaan 720p-, 1080p-, 1440p ja 4K-resoluutioiden virrankulutusta verrattuna

laatu-, suorituskyky- ja ultrasuorituskykytiloihin. Skaalausteknologiat skaalasivat 4K-resoluutioon. Tutkimuksessa käytettiin NVIDIA FrameView-ohjelmaa, joka tallentaa suoritustietoja. Mittarina käytetään etenkin joulea kuvassa, sekä käänteistä suoritusta jouleissa. [30]

Tutkimuksessa huomataan sekä DLSS:n, että FSR:n käytön kasvattavan tietokoneen näytönohjaimen ja prosessorin yhteiskulutusta. DLSS kuluttaa ilman kuvagenerointia hieman alle yhden prosenttiyksikön enemmän virtaa kuin FSR kaikilla testatuilla asetuksilla. Esimerkiksi ultrasuorituskykytila kasvatti energiankulutusta sekä DLSS:n että FSR:n tapauksessa hieman alle 6 %. Kuvagenerointia käytettäessä DLSS alkaa säästämään virtaa. Kuvageneroinnin avulla DLSS säästi ultrasuorituskykytilassa noin 7 % virtaa, kun taas FSR kasvatti yhä virrankulutusta, mutta vain prosentin verran. [30]

Yleisesti tuloksista huomataan että skaalausteknologioita käytettäessä näytönohjaimen virrankulutus laskee hieman, mutta koska kuvien tuottaminen kasvaa, joutuu prosessori kuluttamaan enemmän virtaa. Wattikohtainen suoritus kasvoi joka pelissä skaalausteknologioiden ollessa käytössä, eli pelit tuottivat enemmän kuvia käyttäessään vähemmän virtaa. Ilman kuvagenerointia, vaikka näytönohjaimen virrankulutusta pystyttiin vähentämään, kasvoi prosessorin ja näytönohjaimen yhteinen kulutus noin prosentin verran. Kun kuvagenerointi otettiin käyttöön, väheni energiankulutus 2.65 %. Huomattiin myös että alhaisemmalta resoluutiolta skaalattaessa pikselikohtainen energia oli suurempi kuin ylemmillä resoluutioilla. [30]

Tutkimuksessa ultrasuorituskykytila tuottaa parhaat säästöt energiankulutukselle. Säästöjen pääteltiin syntyvän yksittäisten kuvien pienemmästä laskenta-ajasta. Huomattiin myös, että kuvataajuuden rajoittaminen 30 kuvaan sekunnissa paransi energiatehokkuutta, mutta mikäli kuvataajuutta ei rajoitettu, kasvoi energiankulutus suorituskyvyn nousun mukana. [30]

Vaikka tutkimuksen perusteella energiankäyttöä onkin mahdollista vähentää omil-

la laitteilla, on hyvä ajatella myös energiaa, joka kuluu koulutettaessa malleja. Yksittäisen mallin kouluttamiseen kuluu valtava määrä energiaa ja malleja kehitetään jatkuvasti, joten myös mallin koulutus olisi mielenkiintoista lisätä osaksi jatkotutkimuksia. Kuvataajuuden rajoittaminen 30:neen kuvaan sekunnissa ei ole myöskään usein haluttua peljä pelatessa. Tämän perusteella voidaan todeta, että vaikka näytönohjaimen energiatehokkuus paranee skaalausteknologioita käytettäessä, kasvaa koko tietokoneen energiankulutus etenkin nousevan suorituskyvyn vuoksi. [30]

6 Yhteenveto

Tutkielmassa tarkasteltiin ja vertailtiin NVIDIA DLSS ja AMD FSR -teknologioita ja niiden vaikutuksia nykyajan pelikokemukselle. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin luvussa 2, mutta teknologioiden välinen vertailu oli keskeinen osa myös muita lukuja. Teknologioiden tehtävänä on luoda natiivia resoluutiota pienemmästä kuvasta halutun resoluutioon kokoinen kuva. Teknologioista on siis etenkin hyötyä 1440p- ja 4K-resoluutioilla pelatessa johtuen suuresta pikselimäärästä. Ensin todettiin teknologioiden olevan toimintaperiaatteeltaan hyvin erilaiset. Uusinta FSR 4 -versiota lukuunottamatta AMD on käyttänyt skaalaukseen ja kuvagenerointiin perinteisiä algoritmeja. [11], [13], [7] AMD on siis vasta 2025 vuoden lopussa siirtynyt käyttämään tekoälyalgoritmeja ja -malleja. [8] DLSS on taas alusta asti ollut tekoälyä hyödyntävä teknologia. Ensimmäiset versiot käyttivät konvoluutioneuroverkkoja [3], [10], [5], mutta uusin DLSS 4 -version hyödyntää transformer-mallia. [6] Tekoälymallien ongelmana on niiden vaatimat muutokset laitteistolle. Ensimmäiset FSR -versiot toimivat lähes jokaisella modernilla näytönohjaimella, mutta DLSS ja FSR 4 toimivat vain tietyillä näytönohjaimilla.

Toiseen tutkimuskysymykseen vastattaessa huomattiin kuvanlaadun olevan teknologioiden suurin ero. DLSS on sekä laskennallisissa että mielipidepohjaisissa tutkimuksissa [19] ja kyselyissä [17] tuottanut paremmat tulokset kuin FSR. DLSS:n voidaan siis katsoa olevan kuvanlaadullisesti parempi skaalausteknologia. Suorituskyvyltään teknologiat ovat taas melko tasavertaisia ja peliriippuvaisia. [21] Havain-

to käy järkeen, sillä suurin suorituskyvyn parannus johtuu alemmasta resoluutiosta, joka vähentää näytönohjaimen kuormitusta. Suurimmat erot teknologioiden välillä ovat siis kuvanlaadussa.

Natiiviin renderöintiin verrattuna suorituskyvyssä taas huomattiin valtava ero skaalausteknologioita käytettäessä jo ennen kuvageneroinnin käyttöönottoa. [22], [23], [25], [24], [26] NVIDIA ja AMD esittelivät jopa noin viisi kertaista parannusta suorituskyvyille. Ilman kuvagenerointia pystyttiin jopa noin 70 % suorituskyvyn parannukseen erikseen testatuissa peleissä. Kuvageneroinnin käyttö taas pystyi jopa yli tuplaamaan kuvataajuuden samoissa peleissä.

Kolmatta tutkimuskysymystä käsitellään eri näkökannoista. Ensin luvussa 5 pohdittiin tekoälyteknologioiden koulutukseen kuluva energiaa muiden tekoälymallien avulla ja huomattiin energiaa kuluvan lyhyessä ajassa erittäin paljon. [27] AMD ja NVIDIA eivät itse ole julkaisseet koulutukseen kuluvan energian määrää. On hyvä myös muistaa, että tekoälyä ei kouluteta täysin kerralla vaan sitä opetetaan jatkuvasti. Itse tietokoneen virrankulutukseen skaalausteknologioilla huomattiin olevan kasvattava vaikutus. Vaikka näytönohjaimen virrankulutus laskikin hieman, kasvoi prosessorin virrankulutus kasvaneen suorituskyvyn takia. Koko tietokone siis kulutti tutkimuksessa enemmän virtaa skaalausteknologioita käytettäessä. Tätä saatiin parannettua rajaamalla kuvataajuus ja käyttämällä kuvagenerointia. DLSS:n tapauksessa kuvageneroinnin avulla tietokoneen virrankulutus saatiin jopa natiivia säästävämmäksi. [30]

Tutkimusta rajoitti eniten suoraan DLSS ja FSR -teknologioita vertailevien tieteellisten artikkelien vähäisyys. Vaikka teknologia kehittyikin jatkuvasti, voisi kuvitella, että teknologian uusiin versioihin tehtäisiin myös laajempia tutkimuksia etenkin suurimmissa päivityksissä. Tutkimuksia rajaavana tekijänä on toki etenkin DLSS:n toiminnan salassapito, mutta edes avoimella lähdekoodilla kehitetyn FSR:n toiminnasta ei ole kovinkaan laajoja tutkimuksia. Toisaalta teknologiasivustojen jul-

kaisemat vertailut vastaavat jo melko laajasti asiakkaiden kysymyksiin, vaikka julkaisujen vertailuissa keskitytäänkin usein vain kuvataajuuteen ja silmämääräiseen kuvanlaatuun.

Jatkotutkimuksia voitaisiin tehdä tutkimusten vähäisyyden vuoksi moneen eri aihealueeseen. Erityisesti energiankulutuksen laajempi tarkastelu sekä tietokone että tekoälykoulutuksen kannalta voisi olla erityisen kiinnostava aihe, sillä energiankulutusta ei ole skaalausteknologioiden yhteydessä käsitelty kovinkaan laajasti. Bergin tutkimuksessa havaittu näytönohjaimen ja prosessorin yhteiskulutuksen kasvu on erityisen kiinnostava havainto. [30] Lisäksi DLSS:ää ja FSR:ää vertailevia tutkimuksia tarvittaisiin lisää varsinkin yksittäisiin osa-alueisiin, kuten suorituskykyyn liittyen.

Tutkielmassa todetaan DLSS- ja FSR-teknologioiden parantaneen videopelien suorituskyvyn optimointia merkittävästi. Niiden avulla voidaan mahdollistaa suuremmat kuvataajuudet säilyttäen samalla natiivia vastaava kuvanlaatu. Skaalausteknologioiden ansiosta myös heikommat näytönohjaimet pystyvät suorittamaan vaativia pelejä korkeilla resoluutioilla ja grafiikka-asetuksilla. Aiemmin suorituskyvyn ja kuvanlaadun parantaminen keskittyi pääosin näytönohjaimen raa'an laskentatehon kasvattamiseen, mutta ohjelmistopohjaiset skaalausteknologiat täydentävän laitteiston kehitystä ja antavat teknologialle uuden kehityssuunnan.

Lähdeluettelo

- [1] NVIDIA Corporation. "NVIDIA History: A Timeline of Innovation", NVIDIA, 2026, viitattu 5. maaliskuuta 2026. url: <https://www.nvidia.com/en-us/about-nvidia/corporate-timeline/>.
- [2] Advanced Micro Devices, Inc. "About AMD", AMD, 2026, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://www.amd.com/en/corporate.html>.
- [3] N. Alarcon. "DLSS: What Does It Mean for Game Developers?", NVIDIA, 2018, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://developer.nvidia.com/blog/dlss-what-does-it-mean-for-game-developers/>.
- [4] O. Rukundo ja H. Cao, "Nearest Neighbor Value Interpolation", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 3, nro 4, 2012. DOI: 10.14569/IJACSA.2012.030405. url: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2012.030405>.
- [5] H. Lin ja A. Burnes. "Introducing NVIDIA DLSS 3", NVIDIA, 2022, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/news/dlss3-ai-powered-neural-graphics-innovations/>.
- [6] NVIDIA Corporation. "DLSS 4: Transforming Real-Time Graphics with AI". Tekninen Raportti, NVIDIA, 2025, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://research.nvidia.com/labs/adlr/DLSS4/>.

-
- [7] Advanced Micro Devices, Inc. "AMD FidelityFX™ Super Resolution 3 (FSR 3) - AMD GPUOpen", AMD, 2023, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://gpuopen.com/fidelityfx-super-resolution-3/>.
- [8] Advanced Micro Devices, Inc. "AMD FSR™ Technologies", AMD, 2025, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://www.amd.com/en/products/graphics/technologies/fidelityfx/super-resolution.html>.
- [9] NVIDIA Corporation. "NVIDIA CUDA", NVIDIA, 2026, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://developer.nvidia.com/cuda>.
- [10] A. Burnes. "NVIDIA DLSS 2.0: A Big Leap In AI Rendering", NVIDIA, 2020, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/news/nvidia-dlss-2-0-a-big-leap-in-ai-rendering/>.
- [11] Advanced Micro Devices, Inc. "AMD FidelityFX™ Super Resolution 1 (FSR 1) - AMD GPUOpen", AMD, 2021, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://gpuopen.com/fidelityfx-superresolution/>.
- [12] Advanced Micro Devices, Inc. "AMD RDNA™ Architecture", AMD, 2026, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://www.amd.com/en/technologies/rdna.html>.
- [13] Advanced Micro Devices, Inc. "AMD FidelityFX™ Super Resolution 2 (FSR 2) - AMD GPUOpen", AMD, 2022, viitattu 12. maaliskuuta 2026. url: <https://gpuopen.com/fidelityfx-superresolution-2/>.
- [14] S. Soans, "Enhancing Real-Time Video Processing With Artificial Intelligence: Overcoming Resolution Loss, Motion Artifacts, And Temporal Inconsistencies", *Journal of Information Systems Engineering and Management*, vol. 10, s. 1127–1138, huhtikuu 2025. DOI: 10.52783/jisem.v10i33s.6540.

- [15] G. d. L Martins ym., "A Review toward Deep Learning for High Dynamic Range Reconstruction", *Applied Sciences*, vol. 15, nro 5339, 2025, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app15105339.
- [16] W. Andermahr. "Nativ vs. DLSS 4.5 vs. FSR AI im Leser-Blindtest", ComputerBase, 2026, viitattu 14. huhtikuuta 2026. url: <https://www.computerbase.de/artikel/grafikkarten/nativ-vs-dlss-4-5-vs-fsr-upscaling-ai-leser-blindtest.95965/>.
- [17] W. Andermahr. "Nativ vs. DLSS 4.5 vs. FSR AI im Leser-Blindtest", ComputerBase, 2026, viitattu 14. huhtikuuta 2026. url: <https://www.computerbase.de/artikel/grafikkarten/nativ-vs-dlss-4-5-vs-fsr-upscaling-ai-leser-blindtest-auswertung.96165/>.
- [18] U. Sara, M. Akter ja M. Uddin, "Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—A Comparative Study", *Journal of Computer and Communications*, vol. 7, s. 8–18, 2019. DOI: 10.4236/jcc.2019.73002.
- [19] S. Sen ja B. Bhushan, "Image Quality Comparison Between Nvidia's Deep Learning Super Sampling and AMD's FidelityFX Super Resolution", teoksessa *2024 International BIT Conference (BITCON)*, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/BITCON63716.2024.10984458.
- [20] A. McLoughlin. "What Is Frame Generation? The GPU Technology Explained in 2026?", TechRadar , 2025, viitattu 11. toukokuuta 2026. url: <https://www.techradar.com/computing/gpu/what-is-frame-generation>.
- [21] T. Schiesser. "How Far Behind Is AMD? DLSS 4.5 vs FSR 4 Tested", TechSpot, 2026, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www.techspot.com/article/3084-nvidia-dlss-4-5-vs-amd-fsr-4/>.
- [22] maxus24. "Hogwarts Legacy: FSR 2.1 vs. XeSS vs. DLSS 3 Comparison Review", TechPowerUp, 2023, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www>.

- techpowerup.com/review/hogwarts-legacy-fsr-2-1-vs-xess-vs-dlss-3-comparison/.
- [23] maxus24. ”Lords of the Fallen: FSR 2.2 vs. DLSS 2 vs. DLSS 3 Comparison Review”, TechPowerUp, 2023, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www.techpowerup.com/review/lords-of-the-fallen-fsr-2-2-vs-dlss-2-vs-dlss-3-comparison/>.
- [24] maxus24. ”Alan Wake 2: FSR 2.2 vs. DLSS 3.5 Comparison Review”, TechPowerUp, 2023, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www.techpowerup.com/review/alan-wake-2-fsr-2-2-vs-dlss-3-5-comparison/>.
- [25] maxus24. ”God of War Ragnarök: DLSS vs. FSR vs. XeSS Comparison Review”, TechPowerUp, 2024, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www.techpowerup.com/review/god-of-war-ragnarok-dlss-vs-fsr-vs-xess-comparison/>.
- [26] maxus24. ”STALKER 2: DLSS vs. FSR vs. XeSS Comparison Review”, TechPowerUp, 2024, viitattu 5. toukokuuta 2026. url: <https://www.techpowerup.com/review/stalker-2-dlss-vs-fsr-vs-xess-comparison/>.
- [27] E. Strubell, A. Ganesh ja A. McCallum, ”Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP”, teoksessa *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, A. Korhonen, D. Traum ja L. Màrquez, toim., Florence, Italy: Association for Computational Linguistics, heinäkuu 2019, s. 3645–3650. DOI: 10.18653/v1/P19-1355. url: <https://aclanthology.org/P19-1355/>.
- [28] A. de Vries, ”The Growing Energy Footprint of Artificial Intelligence”, *Joule*, vol. 7, nro 10, s. 2191–2194, 2023, ISSN: 2542-4351. DOI: 10.1016/j.joule.2023.09.004.

-
- [29] E. Mills, N. Bourassa, L. Rainer, J. Mai, A. Shehabi ja N. Mills, "Toward Greener Gaming: Estimating National Energy Use and Energy Efficiency Potential", *The Computer Games Journal*, vol. 8, joulukuu 2019. DOI: 10.1007/s40869-019-00084-2.
- [30] M. Berg, "Energy Implications of Upscaling and Frame Generation in Games", Master's thesis, Uppsala University, 2024. url: <https://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1888392&dswid=-7242>.