Jonnie Anker

Pilvipelipalvelualustat: arkkitehtuuri, suorituskyky ja käyttökokemus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka, insinööri

Insinöörityö

28.4.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Jonnie Anker
Otsikko:	Pilvipelipalvelualustat: arkkitehtuuri, suorituskyky ja käyttökokemus
Sivumäärä:	26 sivua
Aika:	28.4.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Tieto- ja viestintätekniikka, insinööri
Ammatillinen pääaine:	Smart IoT Systems
Ohjaajat:	Erik Pätynen

Avainsanat: Pilvipelaaminen, arkkitehtuuri, suorituskyky, käyttäjäkokemus, datakeskus, reaaliaikainen suoratoisto, verkon viive, laitteiden yhteensopivuus, reunatietokone, sisällönjakeluverkot.

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia pilvipelaamisen maisemaa keskittyen sen arkkitehtuuriin, suorituskykyyn ja käyttäjäkokemuksiin. Päämääränä oli tarjota perusteellinen ymmärrys pilvipelaamisen vahvuuksista, heikkouksista ja mahdollisista parannuksista.

Työ suoritettiin kattavan tutkimuskatsauksen avulla, joka käsitti olemassa olevia artikkeleita ja tutkimuksia pilvipelaamiseen liittyen. Pilvipelaamisen järjestelmien arkkitehtuuria analysoitiin ja suorituskyvyn arviointimenetelmiä, kuten tuloviiveen ja laadun tutkimuksia sekä käyttäjäkokemuksen arviointeja, tarkasteltiin myös.

Työ paljasti pilvipelaamisen järjestelmien monimutkaisen arkkitehtuurin ja korosti datakeskusten roolia, joissa on erikoistunutta laitteistoa. Se tunnisti yleisiä haasteita, kuten verkon viivettä, tuloviivettä sekä kaistanleveyden rajoituksia ja strategioita näiden haasteiden ratkaisemiseksi, kuten sisällönjakeluverkkoja, reunatietokoneita sekä videokuvan pakkausta ja koodausta tutkittiin. Suorituskykymetriikoita kuten viivettä, kuvanlaatua ja käyttäjätyytyväisyyttä arvioitiin. Pilvipelaamisen potentiaalin immersiivisiä kokemuksia esiteltiin. Ne voivat olla vertailukelpoisia perinteiseen pelaamiseen tietylle kohderyhmälle.

Työn saamat oivallukset voivat olla arvokkaita eri sidosryhmille peliteollisuudessa, mukaan lukien pilvipelaamisen tarjoajat, jotka käyttäjäkokemuksen huomioon ottaen voivat tehdä perusteltuja päätöksiä palvelujen parantamiseen. Työ voi myös toimia oppaana normaalille pilvipelaamisesta kiinnostuneelle yksityishenkilölle.

Abstract

Author:	Jonnie Anker
Title:	Cloud Gaming Platforms: Architecture, Performance and User Experience
Number of Pages:	26 pages
Date:	28 April 2024
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Information and Communication Technology
Professional Major:	Smart IoT Systems
Supervisors:	Erik Pätynen, Senior Lecturer.

Keywords:	Cloud gaming, architecture, performance, user experience, datacenter, real-time streaming, network latency, device compatibility, edge computing, content delivery networks

This study aimed to delve into the realm of cloud gaming, with a focus on its architecture, performance, and user engagement. Its objective was to offer a comprehensive grasp of the strengths, weaknesses, and avenues for enhancement within the domain of cloud gaming.

Conducted through an exhaustive review of existing articles and research on cloud gaming, the study delved into the intricacies of cloud gaming systems' architecture. The architecture of cloud gaming systems was analyzed, and performance evaluation methods, such as input latency and quality assessments, as well as user experience evaluations, were also examined.

The investigation revealed the intricate architecture of cloud gaming systems, underscoring the pivotal role of datacenters equipped with specialized hardware. It identified prevalent challenges such as network latency, input lag, and bandwidth constraints. Moreover, it explored strategies to tackle these obstacles, such as leveraging content delivery networks, implementing edge computing, and optimizing video compression and encoding techniques.

Through the evaluation of performance metrics like latency, image quality, and user satisfaction, the study showcased cloud gaming's potential to deliver captivating experiences comparable to traditional gaming, particularly for specific target demographics.

The insights gained from this study hold significance for diverse stakeholders in the gaming industry, including cloud gaming providers. By prioritizing user experience considerations informed by this research, providers can make informed decisions to enhance their offerings. Additionally, this study can serve as a valuable resource for individuals keen on exploring the realm of cloud gaming.

Sisältö

1 Johdanto 1

2 Arkkitehtuuri 2

2.1 Datakeskukset ja pelipalvelimet 3
2.2 Reaaliaikainen suoratoisto 4
2.3 Asiakaslaitteet 5

3 Heikkoudet 6

3.1 Viive 6
3.2 Kaistanleveys 6
3.3 Pakettihävikki 7
3.4 Graafinen laatu 8
3.5 Kustannustehokkuus 8

4 Suorituskyvyn ja verkon optimointi 9

4.1 Sisällönjakeluverkko (CDN) 9
4.2 Reunalaskenta 10
4.3 Videon pakkaus ja koodaus 11
4.4 Koneoppiminen 12
4.5 GPU serverit 13
4.6 Taulukko – Heikkoudet ja lievittävät teknologiat 14

5 Palveluntarjoajat 15

5.1 Google Stadia 15
5.2 NVIDIA GeForce NOW 15
5.3 Microsoft Xbox Cloud Gaming 16
5.4 PlayStation Now 17
5.5 Amazon Luna 17
5.6 Shadow 18

6 Käyttökokemus 19

6.1 Tutkimuksia 19
6.2 Omat kokemukset 20

7 Yhteenveto 20

Lähteet 23

1 Johdanto

Videopelaaminen on kehittynyt 50-luvun ensimmäisistä tutkimuslaboratorioissa kehitetyistä peleistä kuten britannialaisen professorin A.S Douglasin luomasta ristinolla ”OXO”-pelistä ja kuvan 1 60-luvun ensimmäisestä kotikonsolin prototyypistä ”The Brown Boxista” tietotekniikan suunnannäyttäjäksi ja satojen miljardien dollarien maailmanlaajuiseksi teollisuudeksi. Pelien prosessointi on tapahtunut koko historiansa aikana pääosin erilaisissa pelihalleissa sijaitsevilla tai kotiin ostettavilla paikallisilla laitteilla, kuten pelikonsoleilla ja henkilökohtaisilla tietokoneilla [1]. Pilvipelaamisella tarkoitetaan nykyaikaista teknologiaa, jossa videopelien raskas prosessointi tapahtuu paikallisten laitteiden sijaan tehokkailla pilvipalvelimilla ja renderöity videopelin kuva voidaan suora toistaa internetyhteyden avulla jopa kevyellä asiakaspäätteellä [2]. Vuonna 2022 videopelien markkinaosuus oli 361,8 miljardia dollaria, josta pilvipelaamisen osuus oli 2,7 miljardia dollaria eli noin 0,7 prosenttia [3].

Kuva 1 The Brown Box -prototyyppi [4].

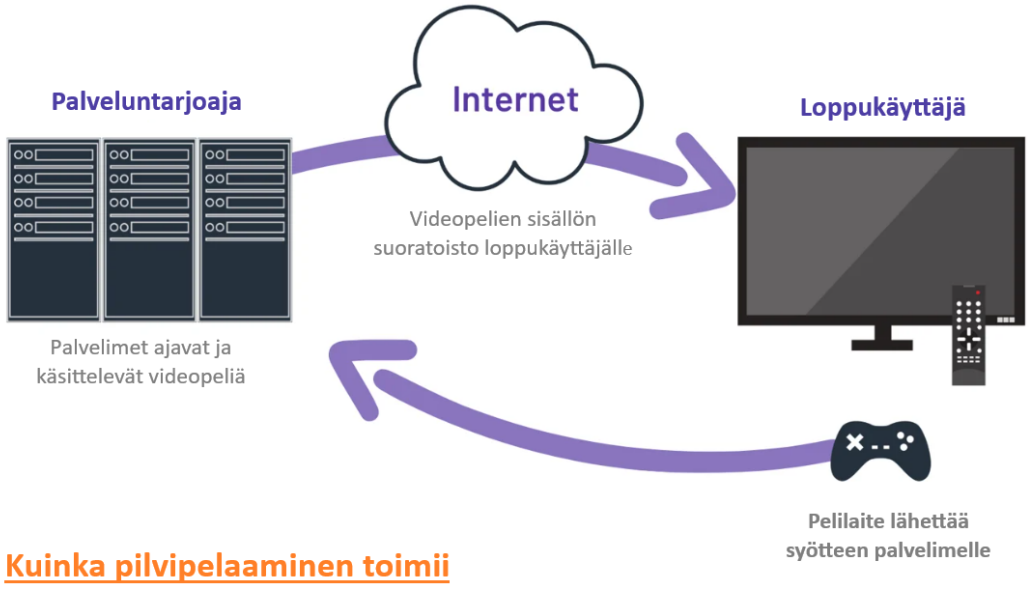
Vuonna 2000 suomalainen G-Cluster-niminen yritys esitteli E3-messuilla maailman ensimmäisen pilvipelipalvelualustan, jossa videopelien prosessointi ja renderöinti tapahtuisi paikallisten laitteiden sijaan yrityksen omilla palvelimilla, ja käyttäjät pääsisivät peleihin käsiksi asennettavan portaalin kautta [5]. Varhainen pilvipelikokeilu oli kuitenkin rajoittunut sen ajan teknologian kuten riittämättömän kaistanleveyden ja korkean latenssin vuoksi. Vuonna 2010 internetyhteyksien,

videokuvan kompression ja älypuhelimien suorituskyvyn teknologiset harppaukset mahdollistivat pilvipelaamisen ensimmäisen läpimurron. OnLive-nimisen yrityksen innovatiivinen kompressioteknologia näytti pilvipelaamisen potentiaalin uudella tasolla ja toimi suunnannäyttäjänä tulevaisuuden isoille pilvipelaamisen tekijöille kuten Sonylle, Nvidialle ja Microsoftille [6].

Insinöörityössä on tarkoitus perehtyä tarkemmin, mitä pilvipelaaminen on, millaista laitteistoa ja verkkoteknologiaa se vaatii toimiakseen ja tarkastellaan, miten palvelua optimoidaan nykyaikaisen teknologian avulla, jotta tiedossa olevia heikkouksia ja puutteita voidaan lieventää. Lisäksi tutkitaan eri palveluntarjoajien valikoimaa ja käyttökokemuksia sekä arvioidaan pilvipelaamisen tulevaisuutta.

2 Arkkitehtuuri

Pilvipelaamisen keskeisiä ominaisuuksia ovat käyttäjän esimerkiksi kotioloissa, peliohjaimella tapahtuvan syötteen havaitseminen datakeskuksessa sijaitsevalla tehokkaalla palvelimella, jossa syöte prosessoidaan, renderöidään ja lopulta suora toistetaan käyttäjän päätteelle kuvan 2 osoittamalla tavalla. Tämän prosessin aikaansaaminen sulavasti laadukkaalla kuvanlaadulla ja hyväksyttävällä viiveellä vaatii usean nykyaikaisen teknologian yhteisvaikutuksen millisekuntien aikana. [7.]



Kuva 2 Kuinka pilvipelaaminen toimii [8]

2.1 Datakeskukset ja pelipalvelimet

Datakeskuksella tarkoitetaan tilaa, johon on sijoitettu IT-infrastruktuuria, jonka avulla kehitetään, ajetaan ja toimitetaan erilaisia palveluja tai ohjelmia [9]. Pilvipelaamista varten käytetyt datakeskukset suunnitellaan tarkasti ottaen huomioon pelaamisen eritystarpeet kuten matalan viiveen, korkean saatavuuden, korkean datan määrän ja prosessoinnin. [10.]

Pelipalvelin on datakeskukseen asennettu tietokone, jossa pelien syöte, prosessointi ja renderöinti tapahtuu. Pelipalvelimien komponentit ovat hyvin samankaltaisia kuin kuluttajille myytävät tuotteet, mutta ne on pakattu erilaiseen kokoluokkaan. Esimerkiksi kuvan 3 Nvidian ”RTX Blade” -palvelin on pakattu tiheään noin 135 kiloa painavaan telineasennettavaan palvelimeen, johon sisältyy jopa 20 prosessorinoodia, nopea verkkoliitäntä ja 40 modernia grafiikkaprosessoria 3D-renderöintiä varten. Tiheästi pakattu palvelin voi toistaa jopa 160 pelisessiota käyttäjille samanaikaisesti. [11.]

NVIDIA RTX BLADE SERVER FOR CLOUD GAMING	
Blades/Systems	10 Twin Node
Form Factor	8U 17.6" (Width) x 31.3" (Depth) x 13.82" (Height) 447mm (Width) x 795 mm (Depth) x 351mm (Height)
Weight	300 lbs
Max System Power	6.5 KW
Average Cloud Gaming Power	5 KW
Network	Dual 10 GbE/Node 4x40GbE
NODE SPECIFICATION	
CPU	1 x Intel Core i9 8C/16T @ 3.5GHz
System Memory	64GB
Storage	1 TB M.2 NVME SSD
Graphics Processing Unit	2 x NVIDIA Turing GPUs
Node Power	450W
GPU SPECIFICATION	
GPU	NVIDIA RTX GPU
vGPU Software	GRID vGaming
NVIDIA CUDA® Cores	3,584
Memory Config	16 GB GDDR6
TDP	150 Watts

Kuva 3 Nvidian pelipalvelin [12]

2.2 Reaaliaikainen suoratoisto

Reaaliaikaisella suoratoistolla tarkoitetaan kuvan, äänen tai muun multimedian jatkuvaa lähettämistä reaaliajassa internetin kautta. Kyseinen teknologia on muuttanut tapaa, jolla mediaa kulutetaan tarjoamalla välittömän pääsyn jopa laajoihin multimediavalikoimiin ja on täten tullut osaksi päivittäistä elämäämme. Tämän teknologian on mahdollistanut mm. korkeanopeuksiset yhteydet sekä kehittyneet pakkausalgoritmit. Tunnetuimpia reaaliaikaisen multimedian alustoja ovat esimerkiksi Twitch ja Youtube. Pilvipelaamisessa reaaliaikainen suoratoisto on keskeisessä roolissa, koska pelien sisältö ja pelaajan antama syöte suoratoistetaan käyttäjän päätteelle. [13.]

2.3 Asiakaslaitteet

Datakeskuksissa sijaitsevat palvelimet suorittavat kaiken pilvipelaamiseen tarvittavan raskaan työn, joten käyttäjien päätteinä voi toimia laajempi kirjo erilaisia laitteita. Voidaan sanoa, että laitteet toimivat eräänlaisina suoratoistetun sisällön välittäjinä. Vaikka prosessointi tapahtuu muualla, asiakaslaitteen luonne on myös tärkeä osa pilvipelaamisen infrastruktuuria ja on tärkeä osa kokonaiskokemusta, koska syötteeseen tarvittava ohjain, laitteen verkko-ominaisuudet sekä näyttö ovat pelaamisen keskeisiä ominaisuuksia yleisellä tasolla.

Tabletit ja älypuhelimet ovat nousemassa keskeisiksi tekijöiksi pilvipelaamisen ekosysteemissä, mikä johtuu mobiililaitteiden sekä matkapuhelinverkkojen nousujohteisesta kehityksestä. Monilla pilvipelialustoilla on omat mobiilisovelluksensa, jotka on optimoitu mobiililaitteille. Mobiililaitteisiin voidaan myös yhdistää perinteisiä langattomia peliohjaimia, jotka rikastavat kokemusta. [14.]

Streamerit, kuten kuvan 4 Google Chromecast, antavat käyttäjille mahdollisuuden langattomasti suoratoistaa digitaalista sisältöä eri verkkolähteistä esimerkiksi televisioihin tai audiovisuaalisiin järjestelmiinsä. Näiden laitteiden kasvava suosio juontaa juurensa kyvystä tarjota kätevä tapa käyttää laajaa valikoimaa viihteellistä sisältöä suuremmilta näytöiltä. Monet streamerit tarjoavat myös mahdollisuuden pilvipelaamiseen kuten Google Chromecast, Nvidia Shield, Roku ja Amazon Fire. [15.]

Kuva 4 Google Chromecast -streameri [16]

Myös monet johtavat älytelevisioiden valmistajat ja pilvipelipalvelut ovat ryhtyneet yhteisvoimin integroimaan pilvipelaamista myös suoraan älytelevisioihin, jolloin perinteistä pelikonsolia ei tarvittaisi olohuoneeseen parantaen pelaamisen saavutettavuutta. [17.]

Perinteiset tietokoneet ja pelikonsolit ovat myös keskeisessä roolissa pilvipelaamisen maisemassa. Vaikka laitteilla kykenee pelaamaan myös paikallisesti, pilvipelaaminen toimii lisäominaisuutena esimerkiksi laitteen tilan tai suorituskyvyn loppuessa ja mahdollistaa laitteiden hyödyntämisen ilman jatkuvaa komponenttien tai laitteiden päivittämistä. [18.]

3 Heikkoudet

Pilvipelaaminen tuo monia hyötyjä käyttäjille kuten palvelun saatavuuden ja laitteiden kohtuuhintaisuuden, mutta aiheuttaa myös arkkitehtuurinsa vuoksi useita heikkouksia. Suurin osa heikkouksista johtuu palveluiden riippuvuudesta verkkoteknologiaan. [19.]

3.1 Tuloviive

Tuloviiveellä viitataan aikaan, joka kuluu sähköisen signaalin lähettämisestä ja vastaavan toiminnon toteutumisesta [20.] Videopelaamisen yhteydessä yleisesti käyttäjän syötteiden välitön käsittely on ratkaisevan tärkeää, koska pelien syötteen myöhästyminen vaikuttaa responsiivisuuteen [21.] Eri pelien herkkyyttä tuloviiveeseen on tutkittu ja on huomattu, että eri tyylilajin pelit eroavat toisistaan latenssiherkkyydestään. Ensimmäisen persoonan ammuskelupelit, jotka vaativat nopeaa käden ja silmän koordinaatiota ovat tutkimusten mukaan herkempiä tuloviiveen suhteen kuin esimerkiksi reaaliaikaiset strategiapelit. [22.]

Pilvipohjaiset pelit eivät voi käsitellä käyttäjän syötettä välittömästi paikallisesti. Sen sijaan syöte on lähetettävä pilvipalvelimelle, missä se käy läpi renderöinnin

ennen kuin syöte lähetetään takaisin käyttäjälle. Tämän seurauksena pelien pelaajat voivat kokea lisäkerroksen tuloviivettä. [23].

3.2 Kaistanleveys

Kaistanleveydellä viitataan langallisen tai langattoman verkon datan siirron maksimikapasiteettiin. Käytännössä suurempi kaistanleveys tarkoittaa, että isompi määrä tietoa voidaan siirtää tietyssä ajassa, mikä parantaa suorituskykyä esimerkiksi internetin käytössä, suoratoistossa tai tiedostojen lataamisessa. Kaistanleveyttä mitataan usein bitteinä, kilobitteinä, megabitteinä tai jopa gigabitteinä sekunnin aikana. [24].

Yksi merkittävistä haasteista pilvipelaamisessa liittyy kaistanleveyden tarpeeseen. Riittämättömän kaistanleveyden vaarana on, että saapuvat ruudut katoavat tai kuvanlaatu kärsii, joka johtaa katkonaiseen tai laaduttomaan pelikokemukseen. Lisäksi suuren käyttäjämäärän aikana pilvipalvelimet saattavat kamppailla riittävän kaistanleveyden kanssa. [25].

3.3 Pakettihävikki

Pakettihävikkiä tapahtuu verkossa, kun siirrettävät datapaketit eivät saavuta kohdettaan. Tämä voi johtua lukuisistä eri tekijöistä kuten langattomista yhteyksistä tai ruuhkaisesta verkosta. Pakettihävikki voi aiheuttaa katkoksia reaaliaikaisissa sovelluksissa kuten verkkopelaamisessa. Pakettihävikin laajuutta mitataan laskemalla prosenttiosuus kadonneista datapaketeista suhteessa siirrettyjen pakettien kokonaismäärään. [26].

On tutkittu, että jopa 1 % pakettihävikki voi tehdä pilvipohjaisista peleistä käyttökelvottomia. Tästä syystä pakettihäviö asettaa merkittävän haasteen käyttäjäystävällisen pilvipohjaisen pelipalvelun kehittämiseen. [27].

3.4 Graafinen laatu

Toisin kuin perinteisessä pelaamisessa, pilvipohjaisen pelin graafinen laatu saattaa kärsiä huomattavasti riippuen verkkoyhteyden olosuhteista. Palvelimen videoenkooderin tehtävänä on välittää korkealaatuista kuvaa suoratoistona ja sen suurimpana haasteena on sen kyvyttömyys ennakoida tulevat peliruudut, koska ne renderöidään välittömästi. Tämä voi aiheuttaa kuvan 5 esittämien graafisten artefaktien ilmestymistä. [28.]

Kuva 5 Pilvipelaamisessa ilmestyviä graafisia artefakteja [29]

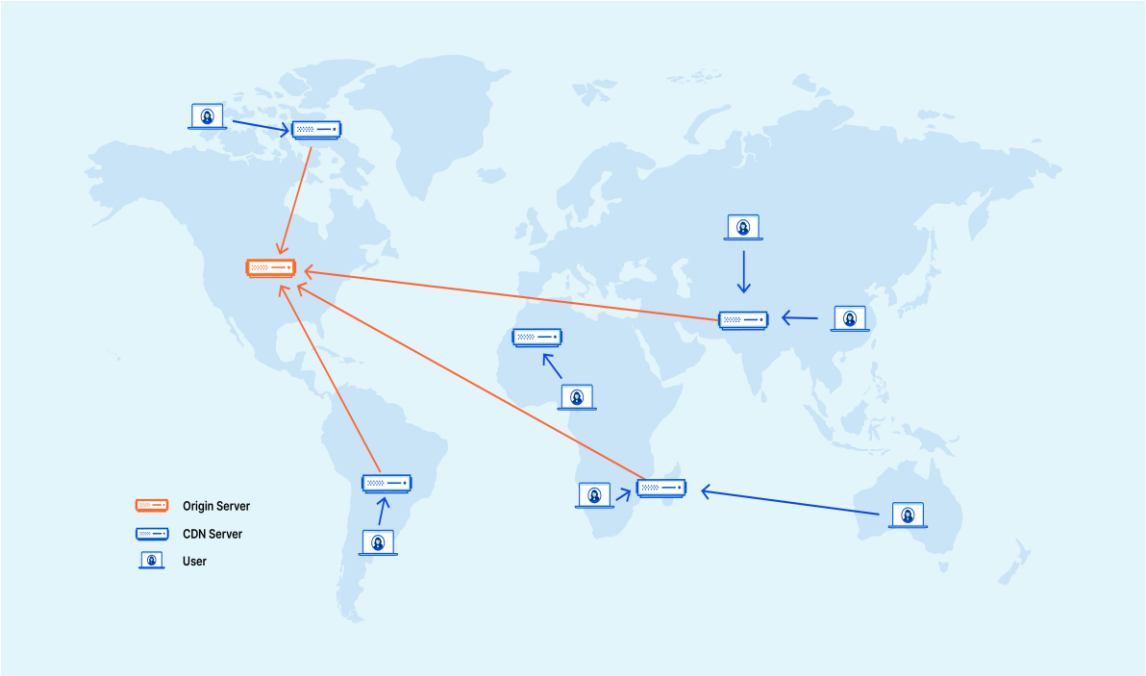
3.5 Kustannustehokkuus

Pilvipelaamisen palveluntarjoajien on otettava huomioon pilvipelaamisen verkkovaatimukset, komponentit, pelien lisenssit ja virrankulutus, jotka voivat johtaa korkeampiin kustannuksiin. Yleisesti ottaen pilvipelipalveluntarjoajat voivat kohdata haasteita liittyen datakeskusten operatiivisiin kustannuksiin sekä palvelun kannattavuuteen. Pilvipelaamisen rajoitettu skaalautuvuus edellyttää suurempaa kaistanleveyden käyttöä datakeskuksille ja enemmän pilvipalvelimia, mikä voi johtaa korkeampiin kustannuksiin palveluntarjoajille. [30.]

4 Suorituskyvyn ja verkon optimointi

4.1 Sisällönjakeluverkko (CDN)

Sisällönjakeluverkolla (CDN, englanninkielinen termi Content Delivery Network) tarkoitetaan strategisesti maantieteellisesti hajautettua palvelinten verkostoa, jonka tavoitteena on lieventää viiveeseen, kaistanleveyteen ja palvelinten kuormitukseen liittyviä haasteita (kuva 6). CDN:n avulla voidaan optimoida esimerkiksi verkkosisältöjen toimitusta internetin välityksellä käyttämällä hajautettua lähestymistapaa yhden palvelimen sijaan. Pilvipelaaminen hyödyntää sisällönjakeluverkkojen montaa osa-aluetta.



Kuva 6 - Sisällönjakeluverkko

CDN:n pääasiallinen etu on merkittävä viiveen vähentäminen sijoittamalla palvelimet fyysisesti mahdollisimman lähelle käyttäjiä. Tämä minimoi viiveen käyttäjän ohjaimesta lähtevän syötteen, palvelimen vastauksen ja ruudulla tapahtuvan toiminnan välillä.

CDN:t toimivat myös merkittävänä apuna verkkopalvelujen skaalauksen ja luotettavuuden edistämisessä. Saapuva liikenne jakautuu useiden palvelimien kesken ja estää palvelinten ylikuormittumisen korkean kysynnän aikana. Tämä ominaisuus turvaa yhtenäisen suorituskyvyn ja parantaa luotettavuutta.

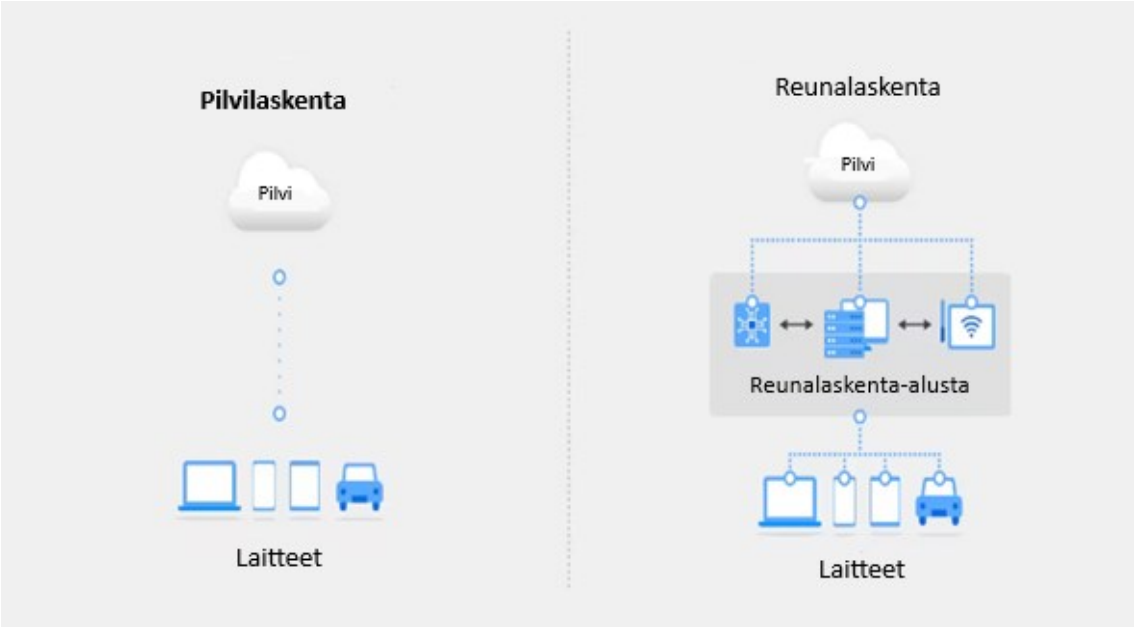
Sisällönjakeluverkot tuottavat hyötyä myös kaistanleveyden optimoinnissa käyttäen välimuistissa olevaa dataa ja siten vähenee tarve toistuville tiedonsiirroille pääpalvelimen ja käyttäjien välillä. Tämä tehostaa verkkoresurssien käyttöä, esimerkiksi pilvipelien latausajassa. Tämän lisäksi CDN:t lieventävät myös palvelunestohyökkäysten vaikutusta jakamalla rasituksen usealle palvelimelle [31].

4.2 Reunalaskenta

Reunalaskenta edustaa CDN:n tapaan hajautettua mallia, joka tuo sisällön sijaan laskentaresurssit lähemmäksi datan lähdettä kuten kuvassa 7. Reunalaskennan kyky käsitellä tietoa paikallisesti tai lähellä datan syntyä, alkuperäisen palvelimen sijaan vähentää tarvetta siirtää dataa pitkiä matkoja, mikä johtaa matalampaan viiveeseen. Lisäksi reunalaskenta optimoi kaistanleveyttä suodattamalla tietoa paikallisesti ja lähettää vain olennaisen datan pilveen säästäen verkkoresursseja [32].

Darsh Lin tutkimuksessa ”Gaming on Edge-Cloud System” [33] käsiteltiin reunalaskennan mahdollisuuksia pilvipelaamisen haasteisiin. Koe toteutettiin käyttämällä sekä pilvi- että reunapalvelimia GA-nimisen alustan ja Assault Cube -pelin kanssa. Tulokset osoittivat, että käyttämällä reunapilvipelaamista pakettihävikki ja viive lievenivät verrattuna perinteiseen pilvijärjestelmään.

Tutkimuksessa ”Improving Cloud Gaming Experience through Mobile Edge Computing” [34], jonka tarkoituksena oli siirtää pilvipelaamisen intensiivinen renderöinti verkon reunaan, joka hyödynsi reunalaskenta- ja välimuistiresursseja, huomattiin, että verkon viive ja kaistanleveyden kulutus väheni. He kuitenkin tunnustivat mahdolliset haitat, kuten lisääntyvät kustannukset ja vakauden heikkenemisen reunasolmuja lisätessä.



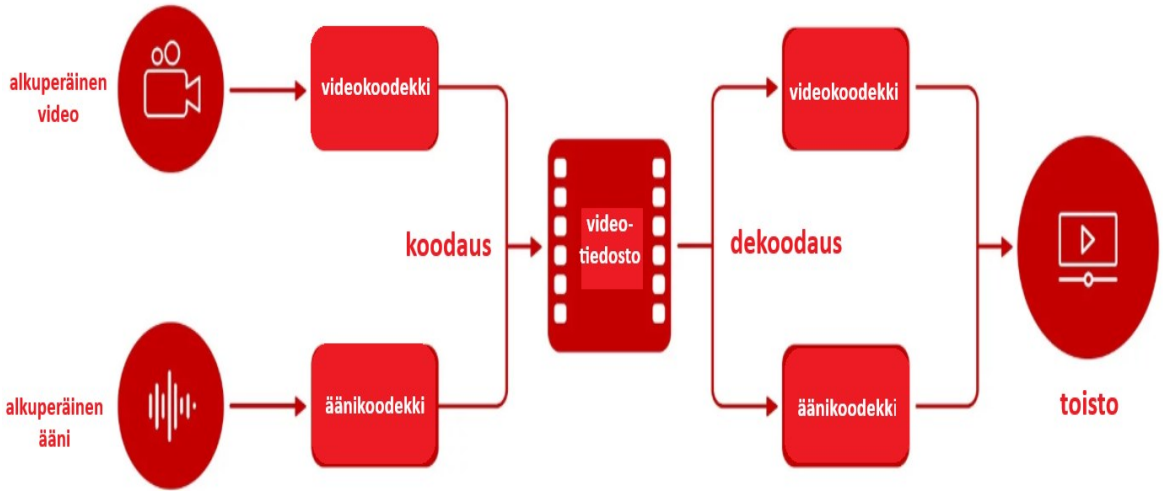
Kuva 7. Reunalaskenta [35]

4.3 Videon pakkaus ja koodaus

Videon pakkaus ja koodaus ovat kriittisiä prosesseja videon digitaalisen videon maailmassa. Sen tarkoituksena on pienentää tiedostokokoa, jotta säilytetään hyväksyttävä kuvan- ja äänenlaatu.

Videon pakkauksella tarkoitetaan tekniikkaa, jolla käytettävän datan määrää vähennetään ottaen huomioon ihmisen havainnoinnin rajoituksia. Tämä johtaa pienempään tiedostokokoon mutta pienten yksityiskohtien menetykseen. Yleisimpiä videon pakkausstandardeja ovat H.264, H.265 ja VP9.

Videon koodaus viittaa prosessiin, jossa raakadigitaalinen videotieto muunnetaan tietyksi muodoksi käyttäen tiettyä koodekkia. Koodaus sisältää pakkaamisen vaiheena, mutta siihen liittyy myös muita näkökohtia, kuten tiedostomuodon valinta ja metatietojen lisääminen purkamista varten. Käytännössä kun puhutaan videon koodauksesta, sillä tarkoitetaan koodekkien ja tiedostomuotojen käyttöä, jotta videotiedostoja on helpompi säilyttää, jakaa ja toistaa eri laitteilla kuten esitetty kuvassa 8. Yleisimpiä videokoodekkeja ovat x264, x265, VP9 ja AV1, kun taas yleisimpiä tiedostomuotoja ovat MP4, MKV AVI ja MOV [36].



Kuva 8 Videon koodaus [37]

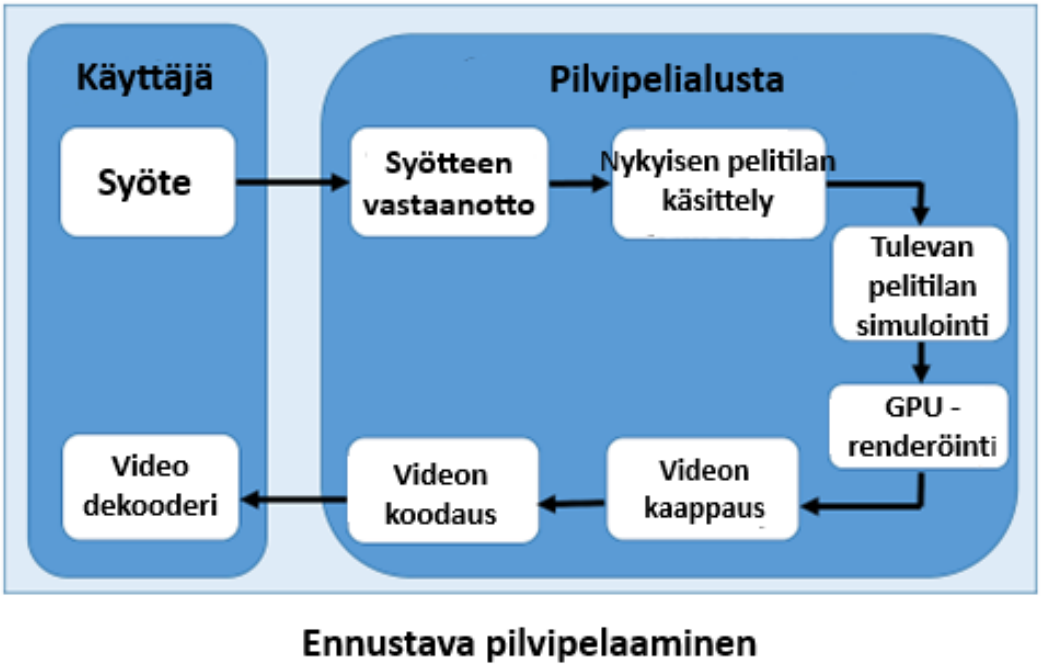
4.4 Koneoppiminen

Koneoppiminen on ratkaisevassa roolissa pilvipelaamisen edistämisessä mm. grafiikan laadun parantamisessa sekä liikenteen reitityksen optimoinnissa, jolloin videokuva saavuttaa käyttäjän tehokkaimman verkkoreitin kautta. Lisäksi koneoppimismallit voivat ennustaa verkkoruuhkia mikä siirtää käyttäjiä proaktiivisesti palvelimille, joilla on alhaisempi viive. [38.]

Vuonna 2017 tehdyssä tutkimuksessa väitettiin teoreettisen mallin avulla, että ennustavan pilvipelijärjestelmän avulla voidaan potentiaalisesti vähentää viivettä verrattuna tavanomaiseen pilvipelipalveluun [39] [kuva 9]. Google on väittänyt myös vuonna 2019 kehittävänsä koneoppimista hyödyntävää tekniikkaa Google Stadia palveluunsa, joka kykenee ennustamaan pelaajan syötteen ja siten luomaan ”negatiivista viivettä”. Google Stadia sulki ovensa kuitenkin tammikuussa 2023 eikä konkreettista näyttöä Googlen väittämän teknologian toimivuudesta löydy. [30.]

Nvidia DLSS eli Deep Learning Super Sampling on NVIDIA:n kehittämä tekniikka heidän näytönohjaimilleen (GPUs). DLSS käyttää tekoälyä ja syvän oppimisen tekniikoita parantaakseen reaaliaikaista kuvanlaatua skaalaamalla

alhaisemman resoluution kuvia. Tämä mahdollistaa paremman visuaalisen laadun säilyttäen samalla korkean suorituskyvyn graafisesti vaativissa sovelluksissa, erityisesti videopelien osalta. [41.]



Kuva 9 ennustava pilvipelaaminen. [39]

4.5 GPU-palvelimet

GPU-palvelimet viittaavat palvelimiin, joissa on yksi tai useampi omistettu grafiikkaprosessoriyksikkö (GPU), jotka on suunniteltu erityisesti pilvipelaamiseen tai jopa monimutkaisten matemaattisten ja graafisten laskutoimitusten käsittelemiseen. Toisin kuin perinteiset keskusyksiköt (CPU), GPU:t loistavat tietyissä laskutoimituksissa, jotka mahdollistavat nopean rinnakkaisprosessoinnin laajojen tietojoukkojen käsittelyssä, mikä tekee niistä ihanteellisia tehtäviin, jotka vaativat graafista suorituskykyä tai korkeaa laskennallista tehokkuutta. [42.]

4.6 Pilvipelaamisen heikkoudet ja lievittävät teknologiat

Taulukko 1 havainnollistaa, että esitetyt ratkaisut lieventävät kukin kahdesta kolmeen erillistä ongelmaa ja haastetta. Ensinnäkin viiveen tuottamia ongelmia voidaan lieventää CDN:n, reunatietokoneiden hyödyntämisen ja koneoppimisen integroinnin avulla. Toiseksi kaistanleveyden rajoitukset voidaan ratkaista pakkaustekniikoilla yhdistettynä koodaustekniikoihin, yhdessä reunatietokoneiden, CDN:n ja koneoppimisen käytön kanssa. Kolmanneksi pakettien menetyksen käsitteleminen nojaa pääasiassa reunatietokoneiden ratkaisujen hyödyntämiseen. Neljänneksi grafiikan laadun optimoiminen voi sisältää pakkaustekniikoiden käytön yhdessä koodaustekniikoiden kanssa ja palvelimien graafisen laskentatehon hyödyntämisen. Lisäksi palvelun kustannusten hallinta vaatii usein GPU-pohjaisten palvelinten valitsemista

	Viive	**Kaistanleveys**	**Pakettihävikki**	**Graafinen laatu**	**Kustannuste-hokkuus**
CDN	✓	✓			
Reunalaskenta	✓	✓	✓		
Pakkaus ja en-koodaus		✓		✓	
GPU palvelimet				✓	✓
Koneoppiminen	✓	✓			

Taulukko 1

5 Palveluntarjoajat

Pilvipelaaminen kasvaa vuosi vuodelta suositummaksi ja myös palveluntarjoajia on useita. Palveluntarjoajat eroavat toisistaan usein alustoillaan, ominaisuuksiltaan, heikkouksiltaan ja vahvuuksiltaan. Tämä luku pyrkii tarjoamaan vertailevan yleiskatsauksen merkittävimmistä pilvipelauspalveluntarjoajista, mikä korostaa niiden erityispiirteitä, hinnoittelumalleja, teknisiä ominaisuuksia, laitteisto- ja verkkovaatimuksia sekä pelikirjastoja.

5.1 Google Stadia

Google Stadia oli Googlen pyrkimys ryhtyä pilvipelaamisen isoksi tekijäksi vuonna 2019. Pelaamisen vaatimuksia olivat televisiolla Chromecast-toistin ja Googlen oma peliohjain, Chrome-verkkoselain tietokoneella tai Googlen Pixel-mobiililaite. Palvelun perusversiolla, jolla kykeni suoratoistamaan 1080p tarkkuudella pelikuvaa, ei ollut kuukausimaksua ja 4k tarkkuudella kuukausimaksu oli 9,90 €/kk. Stadia vaati luotettavan ja nopean internetyhteyden. Google suositteli vähintään 10 megabitin sekuntinopeutta 720p tarkkuudelle ja 35 megabitin sekuntinopeutta 4K-tarkkuudelle. Suurimpana erona muihin alustoihin oli, että Google möi pelejä erikseen, jotka toimivat ainoastaan Stadia-alustalla. [43.]

Google lopetti Stadian tammikuussa 2023 ja joutui palauttamaan asiakkailleen rahat kuukausimaksuista, laitekustannuksista sekä palvelun kautta ostetuista peleistä. Todennäköinen syy palvelun alasajoon oli malli, jossa pelit tuli ostaa erikseen kuukausimaksulla toimivan valmiin pelikirjaston sijaan [44].

5.2 NVIDIA GeForce NOW

NVIDIA GeForce Now on NVIDIA:n kehittämä pilvipelauspalvelu, jossa pelit suoritetaan NVIDIA:n omistamilla tehokkailla palvelimilla ja on suunniteltu toimimaan eri alustoilla, kuten Windows-tietokoneissa, macOS:ssa, NVIDIA Shield -laitteissa ja Android-laitteissa. Se mahdollistaa käyttäjille korkealaatuisten pelien pelaamisen eri laitteilla kun aletaan matalan suorituskyvyn kannettavista

tietokoneista älypuhelimiin ja pyritään tarjoamaan korkealaatuista grafiikkaa, suorituskykyä ja ominaisuuksia kuten säteenseurantaa.

GeForce Now'ssa ei ole pelikauppaa, vaan on alusta, joka mahdollistaa käyttäjien pelaavan pelejä, jotka he jo omistavat muilla alustoilla, kuten Steam, Epic Games Store tai Uplay. Käyttäjät linkittävät pelejä tileiltään ja voivat käyttää olemassa olevia pelikirjastojaan pilvessä. GeForce NOW'ssa optimaalisen suoratoiston suorituskyvyn saavuttamiseksi vaaditaan vähintään 45 Mbit/s:n internetyhteys, kun suoratoistetaan 2160p:n resoluutiolla 120 kuvaa sekunnissa (FPS) sekä 35 Mbit/s 1440p resoluutiolla ja 1080p resoluutiolla 240 FPS:llä. Lisäksi parannetun vakauden saavuttamiseksi suosittellaan käyttämään kiinteää Ethernet-yhteyttä tai 5 GHz:n langatonta verkkoyhteyttä. [45.]

5.3 Microsoft Xbox Cloud Gaming

Xbox Cloud Gaming, aiemmin tunnettu nimellä Project xCloud, on Microsoftin kehittämä pilvipohjainen pelauspalvelu, joka on suunniteltu toimimaan monilla alustoilla, kuten Xbox-konsoleilla, Windows-tietokoneilla ja mobiililaitteilla. Microsoft ilmoittaa, että optimaalinen pelikokemus saavutetaan nopeuksilla 10 Mbit/s mobiililaitteille, 20 Mbit/s konsoleille, tietokoneille ja tableteille, käyttämällä 5 GHz:n WiFi-yhteyttä, langallista verkkoa tai mobiilidataa.

Xbox Cloud Gaming on tiiviisti integroitu Xbox Game Passiin, Microsoftin tilauspohjaiseen pelauspalveluun. Xbox Game Pass Ultimate -tilaajat saavat pääsyn Xbox Cloud Gamingiin osana tilaustaan, mikä mahdollistaa monipuolisen pelikirjaston pelaamisen ilman lisäkustannuksia. Käyttäjät voivat valita suosikkinsa laajasta pelivalikoimasta, ja kirjastoa päivitetään säännöllisesti uusilla lisäyksillä. Alusta mahdollistaa myös käyttäjien pelin etenemisen myös saumattomasti eri laitteilla. Esimerkiksi konsolilla aloitettu peli voidaan jatkaa tietokoneella tai mobiililaitteella. [46.]

5.4 PlayStation Now

PlayStation Now on Sony Interactive Entertainmentin kehittämä pilvipohjainen pelauspalvelu, joka tarjoaa käyttäjille monipuolisen kirjaston PlayStation-pelejä suoratoistona. PlayStation-pilvipelaus on suunniteltu toimimaan monilla alustoilla, mukaan lukien PlayStation-konsolit, Windows-tietokoneet ja valikoidut Sony Bravia -televisiot. Sony ilmoittaa verkkovaatimuksiksi minimissään 5 Mbit/s ja 1080p laadulle 15 Mbit/s nopeutta.

Pelien pääasiallinen pelaamistapa on suoratoisto, mutta Sony on tuonut mukanaan ominaisuuden, joka mahdollistaa tiettyjen pelien lataamisen paikalliselle PlayStation-konsolille. Tämä tarjoaa vaihtoehdon käyttäjille, jotka haluavat pelata pelejä paikallisesti ilman suoratoistoa. PlayStation-pilvipelaajat voivat tallentaa pelinsä etäpilveen, mikä mahdollistaa pelaamisen jatkamisen eri laitteilla saumattomasti. Playstation Now integroitiin osaksi Playstation Plus -tilausta toukokuussa 2022. [47.]

5.5 Amazon Luna

Amazon Luna on Amazonin kehittämä pilvipohjainen pelauspalvelu, joka on suunniteltu toimimaan eri alustoilla, mukaan lukien Windows-tietokoneet, Mac-tietokoneet, Amazon Fire TV:t ja verkkoselaimet erilaisilla laitteilla. Amazon Lunalla on oma ohjain, joka on suunniteltu käytettäväksi palvelun kanssa. Käyttäjät voivat kuitenkin pelata myös hiirellä ja näppäimistöllä tai muilla tuetuilla ohjaimilla. Amazon ilmoittaa, että käyttäjän pelatessa Lunalla vaaditaan vähintään 10 Mbit/s:n internetyhteys ja pilvipelaus voi kuluttaa jopa 10 gigatavua dataa tunnissa 1080p-tarkkuudella.

Luna esittelee käsitteen "Game Channels" eli pelikanavat, jotka ovat tilauspalveluja tarjoten pääsyn pelikokoelmiin. Käyttäjät voivat tilata tiettyjä kanavia päästäkseen käsiksi pelien julkaisijoilta, kuten Ubisoftiin, kun tarjotaan heille mahdollisuus kuratoituun valikoimaan pelejä. Luna on myös integroitu muihin

Amazon-palveluihin. Esimerkiksi käyttäjät voivat käyttää Luna-palvelua suoraan Amazon Fire TV -laitteistaan. [48.]

5.6 Shadow

Shadow on pilvipohjainen pelausalusta, joka tarjoaa käyttäjille pilvipohjaisen Windows 10 -virtuaalikoneen, tarjoten täyden työpöytäympäristön pilvessä. Tämä virtuaalikone on varustettu huipputason laitteistokomponenteilla, mikä mahdollistaa käyttäjiä suorittamaan vaativia sovelluksia ja pelejä.

Shadow on pääasiassa tunnettu pelaamiskyvyistään. Käyttäjät voivat asentaa ja pelata pelejä virtuaalikoneellaan grafiikka-asetuksilla, jotka vastaavat huipputason pelitietokonetta. Palvelun tavoitteena on tarjota sulava pelaamiskokemus jopa resurssi-intensiivisissä peleissä. Shadow on suunniteltu saavutettavaksi eri laitteilla, mukaan lukien Windows-tietokoneet, Mac-tietokoneet, Linux-tietokoneet, Android-laitteet ja iOS-laitteet. Optimaaliseen kokemukseen Shadow suosittelee vähintään 15 Mbit/s nopeutta, riippumatta internet-yhteyden tyypistä – olipa kyseessä sitten kaapeli, DSL, kuitu tai jopa 4G LTE -matkapuhelinverkko. Lisäksi kokemuksen parantamiseksi suositellaan käyttämään joko Ethernet-yhteyttä tai 5 GHz:n Wi-Fi-verkkoa.

Shadow tarjoaa käyttäjille tietyn määrän tallennustilaa virtuaalikoneessaan, mikä mahdollistaa pelien, sovellusten ja tiedostojen asentamisen. Käyttäjät voivat käyttää ja hallita tiedostojaan kuten paikallisella koneellaan. Shadow tarjoaa myös lisäominaisuuksia, kuten mahdollisuuden käyttää virtuaalikonetta pelaamisen ulkopuolisiin tarkoituksiin, eli sisällöntuotantoon, videoiden muokkaamiseen ja muuhun. [49.]

6 Käyttökokemus

6.1 Tutkimuksia

Vuonna 2023 tehdyssä tutkimuksessa ”Cloud Gaming Consumer Experience” [50] tutkittiin kokemuksia eri pilvipalvelualustoista haastattelemalla neljää aktiivista pelaajaa yli kymmenen vuoden pelaamiskokemuksella. Kolme neljästä tutkimukseen osallistujasta käyttivät Nvidian Geforce Now -alustaa. Käyttäjiltä kysyttiin kontekstin vuoksi heidän internetnopeudestaan, maantieteellisestä sijainnistaan sekä laitteistaan. Keskeiset pilvipelaamista koskettavat kysymykset liittyivät mm. käyttäjäystävällisyyteen, viiveen havaittavuuteen, arvioon kuvanlaadusta ja toivottaviin parannuksiin.

Haastatteluissa tuli ilmi, että kaistanleveys ja viive sekä kyvyttömyys pidempien taukojen pitämiseen kesken pelaamisen automaattisen uloskirjautumisen vuoksi ja pelien modifioinnin mahdottomuus vaikuttivat pelikokemukseen negatiivisesti. Haastatteluissa huomattiin myös, että käyttäjät olivat valmiita hyväksymään pilvipelipalveluiden heikkoudet, kun muita mahdollisuuksia pelaamiseen ei ollut. Tutkimuksessa huomautettiin myös, että haastateltavien pieni määrä sekä heidän samankaltaiset taustansa rajoittivat tutkimuksen laajuutta ja tarjosivat ajatuksia vain kokeneilta pelaajilta, joiden toleranssi viiveen ja kuvanladun suhteen on todennäköisesti pienempi kuin kokemattoman käyttäjän.

Vuoden 2020 tutkimuksessa ”A Comparative Study on the User Experience of PC Gaming vs Cloud Gaming” [51] tutkittiin samaan tapaan neljän pelaajan kokemuksia pilvipalvelualustasta, mutta tutkimuksessa haastateltiin pelaajia, joiden pelitaustat olivat erilaisia. Tutkimuksessa verrattiin xCloud (nyk. Xbox Cloud Gaming) -pilvialustaa paikalliseen pelialustaan (Steam).

Tutkimuksessa suoritettiin ajoitetut sessiot molemmilla alustoilla ja vertailtiin kokemuksia. Tuloksissa huomattiin, että kokematon keskivertopelaajaa ei koe suurta eroa paikallisen ja pilvipelipalvelun välillä, mutta kokeneemmat pelaajat suosivat paikallista pelaamista erityisesti korkean suorituskyvyn tietokoneilla. Kokeneet ja kokemattomat pelaajat olivat samaa mieltä, että suosivat taas

pilvipelaamista matalan suorituskyvyn tietokoneen sijaan. Tutkimuksessa todettiin, että pilvipelaaminen ei ollut valmis korvaamaan paikallista pelaamista mutta palvelee hyvin käyttäjiä, joilta puuttuvat korkean suorituskyvyn laitteet.

6.2 Omat kokemukset

Tässä kappaleessa avataan omia kokemuksia pilvipelaamisesta ja verrataan kokemusta paikalliseen versioon Playstation 5 -konsolilla. Pelinä käytettiin Spider-Man Miles Morales -peliä, jota kokeiltiin ensin Playstationin pilvialustalla ja sen jälkeen paikallisena versiona. Internetyhteytenä toimi 100/10 Mbit/s -yhteys n. 50ms:n viiveellä pilvipalvelupalvelimella.

Välitön pääsy ilman suuria latauksia oli vaikuttavaa. Kuitenkin pelin edetessä viivettä ei voinut olla huomaamatta. Kaupungin halki liikkuminen pelihahmolla tuntui vähemmän reagoivalta. Kuvanlaatu oli kunnioitettava, mutta intensiivisten toimintakohtausten aikana ilmeni satunnaisia artefakteja.

Siirtyessä paikalliseen pelaamiseen PS5-konsolilla kontrasti oli ilmeinen. Reagointi ja sulavuus olivat huomattavasti parempia, ja viive oli minimaalinen. Visuaaliset elementit olivat uskomattoman teräviä. Ne esittelivät konsolin laitteiston täyden potentiaalin. Jokainen kiipeäminen, hyppy ja taisteluliike tuntuivat immersioiselta ja välittömältä, mikä paransi koko pelikokemusta.

Pilvipelaaminen loisti saavutettavuudessaan, mutta paikallinen pelaamiskokemus PS5:llä osoittautui vertaamattomaksi reagoinnin ja graafisen laadun suhteen. Pilvipelaamisen kätevyys on kiistatonta, mutta harrastajalle, joka etsii pelaamisen suorituskyvyn huippua, paikallinen kokemus pysyy vertaansa vailla.

7 Yhteenveto

Vuosien varrella pilvipelaaminen on kokenut merkittävää kehitystä, jota on ajanut teknologian edistysaskeleet ja jatkuva pyrkimys parantaa pelaamiskokemusta. Pilvipelaamisen kehitys on ollut täynnä innovaatioita infrastruktuurissa,

yhteyksissä ja suoratoistomahdollisuuksissa. Alkuperäisistä kokeiluista nykyhetkeen voidaan luonnehtia jatkuvalla pyrkimyksellä tehdä pelaamisesta saavutettavampaa, kätevämpää ja inklusiivisempaa.

Yksi keskeisistä pilvipelaamisen kehitysnäkökohdista on tehokkaiden palvelimien ja vahvojen verkkojen hyödyntäminen. Kyky siirtää laskennallisia tehtäviä etäpalvelimille on mahdollistanut pelien suoratoiston suoraan käyttäjien laitteisiin, mikä vähentää tarvetta korkean suorituskyvyn laitteistolle käyttäjän puolella. Tämä siirtyminen palvelimella tapahtuvaan renderöintiin on ollut mahdollista datakeskusteknologioiden parantumisen ja nopeiden internetyhteyksien laajenemisen myötä.

Videokoodekkien kehitys, sisällönjakeluverkkojen ja reunalaskennan yleistyminen sekä tekoälyn käyttö on edistänyt joitakin varhaisvaiheen haasteita, kuten syöttöviivettä, pakettihävikkiä ja videon laatuongelmia. Nämä teknologiset edistysaskeleet ovat edistäneet saumattomamman ja reagoivamman pelaamiskokemuksen syntymistä pilvessä.

Huolimatta näistä edistysaskelista pilvipelaaminen kohtaa edelleen haasteita, jotka estävät sen suurempaa valtausta pelaamisen markkinoilla. Yksi keskeisistä huolenaiheista on riippuvuus vakaasta ja korkeanopeuksisesta internetyhteydestä. Käyttäjät, joilla on epäluotettava tai hidas internetyhteys, voivat kohdata katkoksia, pelikokemuksen pilaavaa syöttöviivettä tai näkölaadun heikkenemistä, mikä rajoittaa pilvipelaamisen kokemusta huomattavasti.

Toinen huomattava haaste on tiettyjen pelityyppien vaativa luonne ja kokeneiden pelaajien odotukset. Graafisesti vaativat ja nopeatempoiset pelit, erityisesti AAA ja e-Sports-luokan pelit, vaativat laitteistolta paljon resursseja ja ovat erityisen herkkiä viiveelle ja/tai kuvanlaadun heikkenemisellä. Vaikka pilvipelaaminen on edistynyt huomattavasti, se ei vielä vastaa korkean suorituskyvyn paikallista pelaamista

Huolimatta näistä haasteista pilvipelaaminen on löytänyt oman paikkansa ja saattaa toimia käyttökelpoisena vaihtoehtona erityisesti niille, jotka ovat vasta

tutustumassa pelaamiseen tai eivät kykene investoimaan korkean suorituskyvyn laitteisiin. Välitön pääsy, vähentyneet laitevaatimukset ja joustavuus pelata eri laitteilla voivat tehdä pilvipelaamisesta houkuttelevan vaihtoehdon tietylle yleisölle. Pilvipelaamisen kyky demokratisoida pääsy pelisisältöön ilman kalliita laitteistoja on kuitenkin merkittävä askel kohti pelaamisen inklusiivisuutta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka pilvipelaaminen on kulkenut pitkän matkan ja jatkaa edelleen kehittymistään, se ei ole valmis korvaamaan paikallista pelaamista harrastajille, jotka etsivät huipputason suorituskykyä. Kuitenkin se tarjoaa kiistatta saavutettavan ja kätevän vaihtoehdon tehdessään pelaamiskokemuksen saatavammaksi laajemmalle yleisölle. Teknologian ja tekoälyn edetessä ja infrastruktuurin parantuessa pilvipelaaminen mahdollisesti kykenee ottamaan yhä merkittävämmän roolin pelaamisen tulevaisuuden maisemassa.

Lähteet

1. Video Game History. 2017. Verkkoaineisto. <https://www.history.com/topics/inventions/history-of-video-games>. Päivitetty 17.10.2022. Luettu 12.12.2023.

2. Wei Cai, Ryan Shea, Chun-Ying Huang, Kuan-Ta Chen. 2016. A survey on Cloud Gaming: Future of Computer Games. ResearchGate-tietokanta. 12.12.2023.

3. Cloud Gaming – Worldwide. Verkkoaineisto. Statista. <https://www.statista.com/outlook/amo/media/games/cloud-gaming/worldwide#revenue>. Luettu 12.12.2023.

4. Ralps Baer's "Brown Box" prototype. Verkkoaineisto. Bullock Museum. <https://www.thestoryoftexas.com/discover/artifacts/ralph-baer-brown-box>. Luettu 12.12.2023.

5. Kaavya Karthikeyan. 2022. Verkkoaineisto. Cloud Gaming: Is it the Future? <https://www.gameopedia.com/cloud-gaming/>. Luettu 12.12.2023.

6. The Evolution of Cloud Gaming a Look Back at its History. 2022. <https://ts2.space/en/the-evolution-of-cloud-gaming-a-look-back-at-its-history/>. Luettu 12.12.2023.

7. Ryan Shea, Jiangchuan Liu, Edith C.-H Ngai, Yong Cui. Verkkoaineisto. Cloud Gaming: Architecture and Performance. <https://www.sfu.ca/~rws1/papers/Cloud-Gaming-Architecture-and-Performance.pdf>. Luettu 14.12.2023.

8. Devin Pickell. 2019. Verkkoaineisto. What Is Cloud Gaming and is it Really the Future of Gaming? <https://learn.g2.com/cloud-gaming>. Luettu 14.12.2022.

9. What is a data center? Verkkoaineisto. IBM. <https://www.ibm.com/topics/data-centers>. Luettu 20.12.2023.

10. Data Centres for the Gaming Industry. Verkkoaineisto. Stellium DC. https://www.stelliumdc.com/data-centres-for-the-gaming-industry/>. Luettu 20.12.2023.

11. RTX Blade Server. Verkkoaineisto. Nvidia. <https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/Data-Center/cloud-gaming-server/geforce-now-rtx-server-gaming-datasheet.pdf>. Luettu 20.12.2023.

12. Nvidia RTX Server. Verkkoaineisto. Nvidia. <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/rtx-server-gaming/>. Luettu 20.12.2023.

13. Bryan Kramer. 2016. Verkkoaineisto. How Live-Streaming is Going to Crush it in 2016. <https://www.socialmediatoday.com/social-networks/how-live-streaming-going-crush-it-2016>. Luettu 27.12.2023.

14. Mobile Cloud Gaming: The New Era of Gaming. 2024. Verkkoaineisto. Next Gamer Hub. <https://nextgamerhub.com/mobile-cloud-gaming-the-new-era-of-gaming>. Luettu 11.5.2024.

15. Eli Blumenthal, David Katzmaier, Ty Pendlebury, Sarah Lord. 2024. Verkkoaineisto. CNET. <https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/best-streaming-device/>. Luettu 15.3.2024.

16. Chromecast with Google TV. Verkkoaineisto. <https://store.google.com/us/product/chromecast_google_tv?hl=en-US&pli=1>. Luettu 15.3.2024.

17. The Future of Cloud Gaming and Smart TVs: Stream Games in 5 Seconds. 2024. Verkkoaineisto. <https://smarttvclub.com/future-of-cloud-gaming-and-smart-tvs/>. Luettu 11.5.2024.

18. PC, Console or Cloud Gaming; Which One Should We Choose? 2023. Verkkoaineisto. Medium. <https://arium-gg.medium.com/pc-console-or-cloud-gaming-which-one-should-we-choose-6d587314384b>. Luettu 11.5.2024.

19. Britanny Baldovino. 2022. An Overview of the Networking Issues of Cloud Gaming: A Literature Review. ResearchGate-tietokanta. Luettu 5.1.2024.

20. Brandon Hill. 2022. What Is Input Latency? A Basic Definition. Verkkoaineisto. Tomshardware. <https://www.tomshardware.com/reference/input-latency-monitors-definition>. Luettu 5.1.2024.

21. Mark Claypool & Kajal Claypool. Latency Can Kill: Precision and Deadline in Online Games. Verkkoaineisto. <https://web.cs.wpi.edu/~claypool/papers/precision-deadline-mmsys/claypool-precision-deadline.pdf>. Luettu 5.1.2024.

22. The Importance of Latency When Gaming. Verkkoaineisto. Socket. <https://www.socket.net/blog/posts/tech-fiber/importance-latency-when-gaming>. Luettu 6.1.2024.

23. A Survey of Cloud Gaming Approaches. Verkkoaineisto. <https://research-repository.griffith.edu.au/rest/bitstreams/3d869f4c-78e7-4a7d-ad2c-5ef7c887d172/retrieve>. Luettu 6.1.2024.

24. Andrew Froehlich. 2021. Bandwidth. Verkkoaineisto. Techtarget. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/bandwidth>. Luettu 8.1.2024.

25. Andrea Di Domenico, Gianluca Perna, Martino Trevisan, Luca Vassio, Dnaillo Giordano. 2021. A Network Analysis on Cloud Gaming: Stadia, GeForce Now and PSNow. Verkkoaineisto. MDPI. <https://www.mdpi.com/2673-8732/1/3/15>. Luettu 8.1.2024.

26. Alexander S. Gillis. Verkkoaineisto. Techtarget. <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/packet-loss>. Luettu 10.1.2024.

27. Sebastian Flinck Lindstrom, Markus Wetterberg, Niklas Carlsson. 2020. Cloud Gaming: A QoE Study of Fast-paced Single-player and Multiplayer Gaming. IEE Xplore tietokanta. Luettu 12.1.2024.

28. Abdul Wahab, Nafi Ahmad, Maria G. Martini, John Schormans. 2021. Subjective Quality Assessment for Cloud Gaming. Verkkoaineisto. https://www.mdpi.com/2571-8800/4/3/31. Luettu 12.1.2024.

29. 2022. Verkkoaineisto. <https://www.reddit.com/r/xcloud/comments/s7ryga/anyone_else_having_this_kind_of_artifacts/>. Luettu 15.1.2024.

30. Florian Metzger, Albert Rafetseder, Svenja Schröder, Patrick Zwickl. 2021. The Prospects of Cloud Gaming: Do the Benefits Outweigh the Costs? Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/353664908_The_Prospects_of_Cloud_Gaming_Do_the_Benefits_Outweigh_the_Costs>. Luettu 15.1.2024.

31. What is a CDN?. Verkkoaineisto. Cloudfare. <https://www.cloudflare.com/learning/cdn/what-is-a-cdn/>. Luettu 24.1.2024.

32. What is edge computing? Verkkoaineisto. Cloudfare. <https://www.cloudflare.com/learning/serverless/glossary/what-is-edge-computing/>. Luettu 24.1.2024.

33. Darsh Lin. 2019. Gaming on Edge-Cloud System. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/334206963_Gaming_on_Edge-Cloud_System>. Luettu 24.1.2024.

34. Xu Zhang, Hao Chen, Zhao Yangchao, Zhan Ma. 2019. Improving Cloud Gaming Experience through Mobile Edge Computing. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/344771771_Improving_Cloud_Gaming_Experience_through_Mobile_Edge_Computing>. Luettu 27.1.2024.

35. 2022. Edge Computing. Verkkoaineisto. Samsung. <https://semiconductor.samsung.com/emea/support/tools-resources/dictionary/edge-computing/>. Luettu 27.1.2024.

36. Anthony Romero. 2018. Verkkoaineisto. IBM. <https://blog.video.ibm.com/streaming-video-tips/what-is-video-encoding-codecs-compression-techniques/>. Luettu 3.2.2024.

37. Video Streaming Encoding – All You Need to Know. Verkkoaineisto. Bianor. <https://bianor.com/lp/video-streaming-encoding/>. Luettu 3.2.2024.

38. The Future of Cloud Technology in Gaming. Verkkoaineisto. Vegavid. <https://vegavid.com/blog/future-of-cloud-technology-in-gaming/#>. Luettu 6.2.2024.

39. Anand Bhojan. 2017. CloudHide: Towards Latency Hiding Techniques for Thin-client Cloud Gaming. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/figure/Predictive-cloud-gaming_fig1_320578846>. Luettu 6.2.2024.

40. Matthew Humphries. 2019. Google Stadia Will Use Input Prediction to Reduce Game Lag. Verkkoaineisto. <https://uk.pcmag.com/news/122976/google-stadia-will-use-input-prediction-to-reduce-game-lag>. Luettu 6.2.2024.

41. DLSS. Nvidia. Verkkoaineisto. <https://www.nvidia.com/fi-fi/geforce/technologies/dlss/>. Luettu 6.2.2024.

42. . GPU Server. Run.ai. Verkkoaineisto <https://www.run.ai/guides/multi-gpu/gpu-server>. Luettu 10.2.2024.

43. 2023. Thank you for playing with us. Stadia was shut down on January 18, 2023. Google. Verkkoaineisto. <https://stadia.google.com/gg/>. Luettu 10.2.2024.

44. Paul Tassi. 2023. Here’s Google Stadia’s Exact Date And Time Of Death. Verkkoaineisto. <https://www.forbes.com/sites/paultassi/2023/01/11/heres-google-stadias-exact-date-and-time-of-death/?sh=75c8da492b1c>. Luettu 10.2.2024.

45. GeForce NOW. Nvidia. Verkkoaineisto. <https://nvidia.com/en-us/geforce-now/>. Luettu 15.2.2024.

46. Xbox Cloud Gaming. Xbox. Verkkoaineisto. <https://www.xbox.com/fi-FI/cloud-gaming>. Luettu 15.2.2024.

47. Playstation Plus. Playstation. Verkkoaineisto. <https://www.playstation.com/fi-fi/ps-plus/>. Luettu 15.2.2024.

48. Amazon Luna. Amazon. Verkkoaineisto. <https://www.amazon.com/luna/landing-page>. Luettu 15.2.2024.

49. Shadow PC. Shadow. Verkkoaineisto. <https://shadow.tech/en-GB>. Luettu 15.2.2024.

50. Nikolay Efimov. 2023. CLOUD GAMING CONSUMER EXPERIENCE. Bachelor’s Thesis. Aalto University. Aaltodoc tietokanta.

51. John Millton 2020. A COMPARATIVE STUDY ON THE USER EXPERIENCE OF PC GAMING VS CLOUD GAMING. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/340823412_A_COMPARATIVE_STUDY_ON_THE_USER_EXPERIENCE_OF_PC_GAMING_VS_CLOUD_GAMIN>. Luettu 20.2.2024