



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Daniel Tisza

Bibliometrinen analyysi hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueista

Analyysi tutkimusalueiden koko elinkaaren ajalta SCOPUS-tietokannan
aineistosta

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Tekniikan kandidaatintutkielma
Automaatio ja tietotekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Daniel Tisza		
Tutkielman nimi:	Bibliometrinen analyysi hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueista: Analyysi tutkimusalueiden koko elinkaaren ajalta SCOPUS-tietokannan aineistosta		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatintutkielma		
Koulutusohjelma:	Tietotekniikan koulutusohjelma		
Opintosuunta:	Automaatio ja tietotekniikka		
Työn ohjaaja:	Janne Koljonen		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	132

TIIVISTELMÄ:

Bibliometrinen analyysi kahden tutkimusalueen eli hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden koko elinkaaren ajalta. Tutkimusalueiden julkaisupopulaatioiden kartoitus ajallisesti ja määrällisesti. Tutkimusalueiden SCOPUS-tietokannasta löytyvien tieteellisten julkaisujen analysointi ja yleisimpien tutkimusaiheiden selvitys tieteellisiin julkaisuihin liitettyihin avainsanoihin, julkaisujen otsikoihin ja julkaisujen abstrakteihin perustuen.

Tekijän ja indeksin avainsanojen laskenta suoritettiin VOSviewer-ohjelmalla. Tekstin louhintaa julkaisujen otsikon ja abstraktin teksteistä yleisimpiä tutkimusaiheita edustavien sanojen ja käsitteiden löytämiseksi tehtiin kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa oli N-grammien laskenta omilla R-kielillä ohjelmilla ja bibliometrix-kirjaston funktioilla. Toinen tapa oli omiin Python-kielisiin ohjelmiin ja VOSviewer-ohjelman substantiivilausekemenetelmään perustuva tekstin louhinta.

Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden ympäristön kartoitus eli näiden kahden tutkimusalueen kanssa merkittävää päällekkäisyyttä sisältävien muiden merkittävien tutkimusalueiden kartoitus edellä kartoitettuihin yleisimpiä tutkimusaiheita edustaviin sanoihin ja käsitteisiin perustuen.

Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden julkaisujen viittausten analyysi eli eniten viittauksia saaneet julkaisut, 100 eniten viittauksia saaneiden julkaisujen yleisimmin käytetyt lähteet sekä 100 eniten viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden joukossa eniten viittauksia saaneet lähteet.

FPGA-tekniikan koko tutkimusalueen esittelyä varten sen koko elinkaaren ajalta keskeisten aiheiden kartoitus "hall of fame" ja "best paper" julkaisujen pohjalta.

AVAINSANAT: bibliometriikka, tekstinlouhinta, hyperspektrikuvantaminen, digitaalitekniikka, mikropiirit, rinnakkaisohjelmointi, FPGA-tekniikka

Sisällys

1	Johdanto	10
1.1	Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset	11
1.2	Tutkielman rakenne	12
2	Taustaa	13
2.1	Bibliometriikka	13
2.1.1	Yleinen esittely	13
2.1.2	Keskeiset aiheet ja oletukset	15
2.1.3	Bibliometrisen analyysin rakenne ja toimintaperiaate	19
2.1.4	Aiempi käyttö tutkimuksessa	25
2.1.5	Soveltaminen tässä tutkielmassa	26
2.2	Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue	27
2.2.1	Yleinen esittely	27
2.2.2	Keskeiset aiheet ja oletukset	30
2.2.3	Nykytilanne ja sovellukset	37
2.2.4	Haasteet ja avoimet kysymykset	38
2.3	FPGA-tekniikan tutkimusalue	41
2.3.1	Ensimmäinen FPGA-piiri ja moderni FPGA-piiri	41
2.3.2	Yleinen teoreettinen viitekehys	44
2.3.3	Keskeisten aiheiden kartoitus	54
2.3.4	Aihealue 1: Teknologia	57
2.3.5	Aihealue 2: Ohjelmointi	60
2.3.6	Aihealue 3: Soveltaminen	65
2.3.7	Aihealue 4: Rekonfigurointi	66
2.3.8	Aihealue 5: AI/ML	70
2.4	Yhteenveto	71
3	Menetelmä ja aineisto	72
3.1	Tietokantojen kartoitus ja aineiston haku	72
3.2	SCOPUS-tietokannasta haettu aineisto	74
3.3	Tutkimusaiheiden löytäminen ja tilastointi	76

3.4	Yhteenveto	77
4	Tulokset: julkaisupopulaatiot	78
4.1	Hyperspektrikuvantamisen julkaisupopulaatio	78
4.2	FPGA-tekniikan julkaisupopulaatio	80
4.3	Molemmat julkaisupopulaatiot	82
5	Tulokset: avainsanojen ja termien analyysi	85
5.1	Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue	86
5.1.1	Avainsanojen mukaan	86
5.1.2	Termilouhinta <i>N</i> -grammeilla	87
5.1.3	Termilouhinta substantiivimenetelmällä	90
5.2	FPGA-tekniikan tutkimusalue	91
5.2.1	Avainsanojen mukaan	91
5.2.2	Termilouhinta <i>N</i> -grammeilla	92
5.2.3	Termilouhinta substantiivimenetelmällä	95
5.3	Molemmilla tutkimusalueilla yleisimmät tutkimusaiheet	96
5.4	Tutkimusalueiden ympäristön kartoitus	98
6	Tulokset: viittausten analyysi	102
6.1	Eniten viittauksia saaneet julkaisut	103
6.2	TOP100 viitattujen julkaisujen yleisimmät lähteet	104
6.3	TOP100 viitattujen julkaisujen eniten viittauksia saaneet lähteet	106
7	Johtopäätökset	109
7.1	Suosituks	109
7.2	Tutkimuksen rajoitukset	109
7.3	Jatkotutkimuksen mahdollisuudet	109
8	Lähteet	111

Kuviot

Kuva 1. Erilaisten metriikan pohjautuvien tutkimusalueiden väliset suhteet (Holmberg, 2015, s. 15).	14
Kuva 2. Vasemmalla hyperspektrikuutio ja oikealla yhdelle pikselille eli (x,y) -sijainnille muodostuva mitatuista reflektanssi- tai radianssiarvoista muodostuva spektrisignatuuri eli ”sormenjälki”.	28
Kuva 3. Ensimmäisen FPGA-piirin arkkitehtuuri (Xilinx, 1988, s. 11).	42
Kuva 4. Ensimmäisen FPGA-piirin konfiguroitava logiikkablokki (Xilinx, 1988, s. 85).	43
Kuva 5. Yksinkertaistettu teknologioiden vertailu: ohjelmoitavuus vs. tehokkuus (Flynn & Luk, 2011, s. 6).	48
Kuva 6. Laskennallinen blokki array elementille (AE) Bolotskin ja muiden (1994) mukaan.	50
Kuva 7. Kaksi eri lookup mallia AE laskennalliselle yksikölle Bolotskin ja muiden (1994) mukaan.	51
Kuva 8. Yleisimmin julkaisuun liitetyt maat hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.	82
Kuva 9. Julkaisujen lukumäärät vuosittain hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.	83
Kuva 10. Molemmat tutkimusalueet mainitsevien julkaisujen lukumäärä vuosittain hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.	84

Taulukot

Taulukko 1. Vaikuttavuuden ja tason (performance) mittareita Donthun ja muiden (2021) mukaan.	21
Taulukko 2. Tiedekartoituksen tekniikoita Donthun ja muiden (2021) mukaan.	22
Taulukko 3. Bibliometriikkaan ja skientometriikkaan liittyvien julkaisujen lukumäärät ja julkaisuvuodet SCOPUS-tietokannassa.	25

Taulukko 4. Bibliometriikkaan, skientometriikkaan ja tutkielman kahteen tutkimusalueeseen liittyvien julkaisujen määrät ja julkaisuvuodet SCOPUS-tietokannassa.	26
Taulukko 5. Hyperspektrikameroiden ominaisuuksia käyttöympäristön mukaan (Hong ja muut, 2026).	37
Taulukko 6. Esimerkkejä hyperkuutioista (Hong ja muut, 2026).	38
Taulukko 7. XC2064 ja VP1902 piirien muutamien ominaisuuksien vertailu.	44
Taulukko 8. Kolmen konferenssin "Call for papers 2026" aiheiden ryhmittely aihealueryhmiin.	54
Taulukko 9. Keskeisien konferenssien julkaisujen kokonaismäärät ja määrät hakusanoilla "fpga*" ja "reconfigur*".	55
Taulukko 10. TCPFGA HOF:iin kuuluvat julkaisukokoelmat ja ARC:n julkaisuvalikoima.	56
Taulukko 11. Julkaisutietokantojen vertailu.	72
Taulukko 12. Aineistohakujen tulokset SCOPUS-tietokannasta.	75
Taulukko 13. Manuaalisesti haettujen TOP100 viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden lukumäärät.	75
Taulukko 14. Tutkielmassa käytetyt termien löytämisen ja tilastoinnin menetelmät ja ohjelmat.	76
Taulukko 15. Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen julkaisupopulaatio.	78
Taulukko 16. Hyperspektrikuvantaminen: SCOPUS ja WOSCC eniten julkaisuja sisältävät aikakauslehdet.	79
Taulukko 17. FPGA-tekniikan tutkimusalueen julkaisupopulaatio.	80
Taulukko 18. FPGA-tekniikka: SCOPUS ja WOSCC eniten julkaisuja sisältävät aikakauslehdet.	81
Taulukko 19. Aineistojen avainsanojen laskennan tulos.	85
Taulukko 20. Aineistojen <i>N</i> -grammien laskennan tulos.	85
Taulukko 21. Aineistojen substantiivilausekemenetelmällä termilouhittujen termien laskennan tulos.	86
Taulukko 22. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät avainsanat.	96

Taulukko 23. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 1-grammit.	96
Taulukko 24. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 2-grammit.	97
Taulukko 25. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 3-grammit.	97
Taulukko 26. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 4-grammit.	97
Taulukko 27. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät termit substantiivimenetelmällä.	97
Taulukko 28. Merkittävät muut tutkimusalueet aikajärjestyksessä.	98
Taulukko 29. Merkittävien muiden tutkimusalueiden päällekkäisyys hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen kanssa.	99
Taulukko 30. Merkittävien muiden tutkimusalueiden päällekkäisyys FPGA-tekniikan tutkimusalueen kanssa.	100
Taulukko 31. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden kannalta viisi tärkeintä päällekkäistä muuta tutkimusaluetta.	100
Taulukko 32. Julkaisujen lukumäärä ja prosenttiosuus tutkimusalueen julkaisupopulaatiosta niiden saamien viittausten vähimmäismäärän mukaan ryhmiteltynä.	102
Taulukko 33. Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueella eniten viittauksia saaneet julkaisut	103
Taulukko 34. FPGA-tekniikan tutkimusalueella eniten viittauksia saaneet julkaisut	103
Taulukko 35. Hyperspektrikuvantamisen TOP100 viitattujen julkaisujen useiten esiintyvät lähteet.	105
Taulukko 36. FPGA-tekniikan TOP100 viitattujen julkaisujen useiten esiintyvät lähteet.	106
Taulukko 37. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden TOP100REF joukoista koottu yhdistelmätaulukko eli 100 eniten viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden joukosta eniten viitatut dokumentit.	107

Algoritmit

No table of figures entries found.

Lyhenteet

ACM	Association for Computing Machinery
ASIC	Application-specific integrated circuit (sovelluskohtainen integroitu piiri)
ASIP	Application-specific instruction processor
ASPLOS	Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems
Bibliometrix	R package for bibliometric analysis
Biblioshiny	Web-based interactive application for bibliometric analysis, part of bibliometrix
CGRA	Coarse-grained reconfigurable architecture/array
CLB	Configurable logic block
CPU	Central processing unit (prosessori)
EDA	Electronic Design Automation
FF	Flip-flop
FCCM	IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines
FPGA	Field-programmable gate array (ohjelmoitava porttimatriisi)
FPL	International Conference on Field-Programmable Logic and Applications
GPP	General purpose processor
GPT	Generative pre-trained transformer
GPU	Graphics processing unit (grafiikkasuoritin)
HDL	Hardware Description Language
HSI	Hyperspectral imaging / Hyperspectral imager
IC	Integrated circuit (integroitu piiri)
ICFPT	International Conference on Field-Programmable Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Impact factor (vaikuttavuuskerroin)
IR	Infrared (infrapuna)
ISCA	International Symposium on Computer Architecture
ISI	Institute for Scientific Information (nykyään osa Thomson Reutersia)
LIS	Library and information science (kirjastotiede ja informatiikka)
LLM	Large language model (suuri kielimalli)
LUT	Lookup table
MIMD	Multiple Instruction Streams Multiple Data Streams
NIR	Near-infrared (lähi-infrapuna)
NOC	Network on Chip (architecture)
R	Software environment for statistical computing and graphics
SCI	Science Citation Index
SCOPUS	A comprehensive abstract and citation database for impact makers

SIGDA	ACM Special Interest Group on Design Automation
SIMD	Single Instruction Stream Multiple Data Streams
SISD	Single Instruction Stream Single Data Stream
SoC	System on a chip (järjestelmäpiiri)
SWIR	Shortwave infrared
RTL	Register-transfer level
TCFPGA	Technical Committee on FPGAs and Reconfigurable Computing (ACM/ SIGDA)
UV	Ultraviolet (ultravioletti)
VIS	Visible (ihmissilmille näkyvä valo)
VLSI	Very large-scale integration (erittäin laajamittainen integrointi)
VOSviewer	Visualization of Similarities viewer, software tool for constructing and visualizing bibliometric networks
WOS	Web of Science
WOSCC	Web of Science Core Collection

1 Johdanto

Yleisesti ottaen tutkimustieto on nykyään organisoitu tekijöidensä mukaan julkaisuihin ja nämä julkaisut viittaavat aiemmin ilmestyneisiin julkaisuihin. Yleensä julkaisut myös ryhmitellään pääasiallisen sisältönsä puolesta tutkimusalueisiin. Tyypillisesti tutkimusalueelle kohdistuvat julkaisut ja erilaiset tutkielmat sisältävät rajatun kirjallisuuskatsauksen, joka kartoittaa julkaisun tai tutkielman aiheen näkökulmasta sisällöltään merkittäviä aiemmin ilmestyneitä julkaisuja. Tutkimusalueen kasvaessa on myös tapana julkaista katsausjulkaisuja tai kirjan muodossa laajempia katsausteoksia, jotka kartoittavat laajemmin kyseisen tutkimusalueen merkittäviä tutkimusaiheita ja sisällöltään merkittäviä julkaisuja. Nämä kirjallisuuskatsaukset, katsausjulkaisut ja katsausteokset voidaan nähdä eräänlaisena pohjakarttana tutkimusalueella tutkitusta tiedosta. Toisaalta niitä tarkastelemalla voidaan havaita tutkimusaukkoja eli mitä mahdollisia tutkimusaiheita tutkimusalueella ei vielä ole tutkittu. Tutkimusalueen katsauksen haasteena on löytää universaalisti hyviä kriteereitä arvioimaan tutkimusalueen tutkimusaiheita ja julkaisujen sisältöjä, jotta arvioinnin jälkeen näiden joukosta voitaisiin poimia katsaukseen mukaan näistä merkittävimmät. Katsauksen tekemiseen ja arviointiin on kehitetty vaihtelevia menetelmiä ja työkaluja, mutta tyypillisesti näissä ihmistyön osuus on suurehko ja rajoittaa siten katsauksen aineiston laajuutta ja ylipäätään katsauksien tuottamista.

Viime aikoina on noussut aiempaa enemmän esille kaksi mielenkiintoista työkalua eli suuret kielimallit (large language model, LLM) sekä bibliometrinen analyysi. Ensimmäisen työkalun eli LLM:n avulla olisi teoriassa mahdollista suorittaa kaikki katsauksen työvaiheet ilman ihmistyötä ja tuottaa katsaus täysin koneellisesti, jos LLM:n koulutusvaiheen aineisto sisältäisi kaikki tutkimusalueen julkaisut. Kuitenkin tällä hetkellä tällaisen täysin koneellisesti LLM:n avulla tuotetun katsauksen laadun arviointi vaikuttaa vielä haastavalta. Lisäksi hyvälaatuisen oman LLM-mallin kouluttaminen laajalla aineistolla vaatisi merkittäviä laiteresursseja. Toinen työkalu eli bibliometrinen analyysi tuottaa koneellisesti suuresta määrästä julkaisuja kvantitatiivista tietoa ilman merkittävää ihmistyötä ja suhteellisen vähäisillä laiteresursseilla. Kuitenkin

bibliometrisen analyysin haasteena on sen tuottaman kvantitatiivisen tiedon käyttökelpoisuus tutkimusalueen katsauksen tavoitteen näkökulmasta eli miten bibliometrisen analyysin tuottama tieto auttaa arvioimaan tutkimusalueen tutkimusaiheiden merkittävyyttä ja tutkimusalueen julkaisujen sisällön merkittävyyttä?

Tätä yleistä taustaa vasten tämä tutkielma tuottaa bibliometrisen analyysin kahdesta tutkimusalueesta eli hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueesta ja FPGA-tekniikan (field-programmable gate array) tutkimusalueesta niiden koko elinkaaren ajalta. Ensinnäkin tutkielma tuottaa konkreettisen kvantitatiivisen aineiston näiden kahden tutkimusalueen tutkimusaiheista ja julkaisuista. Tutkielman tuottamaa kvantitatiivista aineistoa voidaan käyttää arvioimaan näillä tutkimusalueilla saatavilla olevaa tutkimusta sekä toisaalta havaita mahdollisesti lupaavia, mutta vähäiselle tutkimukselle jääneitä aiheita. Toiseksi tutkielma nostaa esille potentiaalisia hyviä kriteereitä arvioimaan tutkimusalueen tutkimusaiheiden merkittävyyttä ja tutkimusalueen julkaisujen sisältöjen merkittävyyttä sekä mahdollistaa jatkotutkimuksen näiden tietojen pohjalta.

Nimenomaan näiden kahden tutkimusalueen valikoituminen tähän tutkielmaan bibliometrisen analyysin kohteeksi johtui kolmesta tekijästä. Ensinnäkin tekijän aikaisempi kokemus näistä kahdesta tutkimusalueesta. Toiseksi bibliometrisen analyysin suhteellisen vähäinen hyödyntäminen juuri näillä kahdella tutkimusalueella. Kolmanneksi ennako-oletus merkittävien potentiaalisten tutkimusaiheiden löytymisestä bibliometrisen analyysin keinoin näiden kahden tutkimusalueen rajapinnasta.

1.1 Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkielmassa on tehty bibliometrinen analyysi kahdesta tutkimusalueesta eli hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueista niiden koko elinkaaren ajalta.

Tutkielman tutkimuskysymykset:

1. Mitä tutkimusaiheita näiltä tutkimusalueilta on löydettävissä ja mikä on löydettyjen tutkimusaiheiden keskinäinen järjestys yleisyyden mukaan?
2. Mitkä ovat näiden tutkimusalueiden yhteisesti yleisimmät tutkimusaiheet?
3. Millainen on näiden tutkimusalueiden ympäristö eli mitkä ovat muut läheiset tutkimusalueet?
4. Mitkä ovat eniten viitatus julkaisut näillä tutkimusalueilla?
5. Mitä voidaan selvittää tutkimusalueiden 100:an eniten viittauksia saaneiden julkaisujen sisältämien lähteiden perusteella?

1.2 Tutkielman rakenne

Tutkielma koostuu seitsemästä pääluvusta. Luku 1 on johdanto. Luvussa 2 esitellään tutkimuksen tausta eli bibliometrinen analyysi, hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue ja FPGA-tekniikan tutkimusalue. Luvussa 3 esitellään tutkielman menetelmä ja tutkimusaineisto. Luvussa 4 esitellään löydökset hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden julkaisupopulaatioista. Luvussa 5 esitellään löydökset avainsanojen ja termien analyysistä. Luvussa 6 esitellään löydökset viittausten analyysistä. Luvussa 7 esitellään tutkielman tärkeimmät tulokset, suosituksia tulosten perusteella, tutkielman rajoitukset ja mahdollisia suuntia jatkotutkimuksille.

2 Taustaa

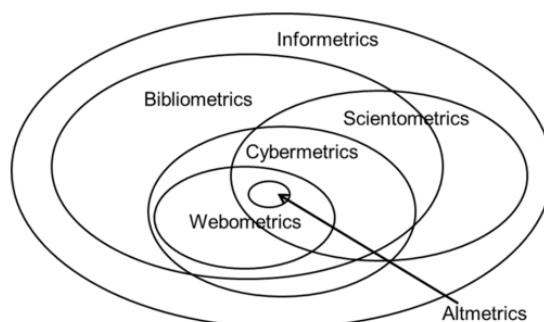
Tässä luvussa esitellään tutkielman taustateorian toimiva bibliometriikan tutkimusalue sekä kaksi tutkielman kohdetutkimusaluetta eli hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue ja FPGA-tekniikan tutkimusalue. Bibliometriikan yleistä esittelyä varten oli suhteellisen helppoa löytää ja hankkia aineistoa. Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen esittelyn pohjaksi valittiin ansiokkaan tutkijajoukon tämän tutkielman kirjoitusvuonna julkaisema koko tutkimusaluetta kattavasti käsittelevä laaja katsausartikkeli. FPGA-tekniikan tutkimusalueella oli vaikeuksia löytää koko tutkimusaluetta sen koko elinkaaren ajalta käsittelevää aineistoa. FPGA-tekniikan koko tutkimusalueen taustoittamiseksi sille luotiin tutkielmassa tiivistetty yleinen teoreettinen viitekehys ja lisäksi tutkimusalueen keskeiset aiheet kartoitettiin tarkastelemalla sen merkittävimpiä konferensseja ja tutkijoiden itse merkittävimmiksi arvioimia ”hall of fame” ja ”best paper” julkaisuja (142 kpl). Nämä julkaisut ryhmiteltiin ensin kolmen merkittävimmän konferenssin ”call for papers 2026” aihealueiden mukaan ja sitten aihealueiden sisällä tehtiin vielä tarkempi alaryhmittely.

2.1 Bibliometriikka

2.1.1 Yleinen esittely

Salinin (Greenfield & Greener, 2016, s. 130) mukaan bibliometriikka on suhteellisen uusi tutkimusala. Edelleen Salinin mukaan tieteellisten julkaisujen ja tieteellisten aikakauslehtien suuren kasvun vuoksi tuli tarpeelliseksi analysoida näiden bibliografista dataa ja bibliometriikka sai tällöin alkunsa tilastollisena työkaluna tämän bibliografisen datan analysointiin. Edelleen Salinin mukaan myöhemmin näkökulman muututtua bibliometriikasta on tullut yleinen työkalu tieteellisen tutkimuksen kvantitatiiviseen arviointiin. Määritelmän puolesta Salin (Greenfield & Greener, 2016, s. 131) lainaa Oxford English Dictionary:a, jonka määritelmän mukaan bibliometriikka on: bibliografiaan matemaattista ja tilastollista analyysiä soveltava kirjastotieteen haara; kirjojen, artikkelien tai muiden julkaisujen tilastollinen analyysi.

Salinin (Greenfield & Greener, 2016, s. 131) mukaan termi bibliometriikka sekoitetaan usein seuraavien samankaltaisten termien kanssa ja hän antaa määritelmät myös näille samankaltaisille termeille. Ensinnäkin Salinin mukaan skientometri on matemaattisten ja tilastollisten menetelmien soveltamista tieteellisiin ja teknologisiin viestintätuotoksiin sen selvittämiseksi, mikä on ollut tutkijoiden, instituutioiden ja kansojen suhteellinen osuus tiedon lisäämisessä. Toiseksi Salinin mukaan infometriikka on informaation kvantitatiivisten aspektien tutkimusta kaikenlaisissa muodoissa (ei ainoastaan kirjoihin, artikkeleihin jne tallennetussa muodossa) ja kaikenlaisissa sosiaalisissa ryhmissä (ei pelkästään akateemikot). Kolmanneksi Salinin mukaan webmetriikka, kybermetriikka ja netmetriikka ovat biblio-, skiento- ja infometriikan menetelmien jatke sovellettuna Internetissä kulkeviin informaatiovirtoihin. Näiden läheisten tutkimusalueiden suhteita on kuvattu myös Holmbergin (2015, s. 15) teoksessa visuaalisesti Venn-diagrammin muodossa ja tämä diagrammi esitetään seuraavassa kuvassa 1.



Kuva 1. Erilaisten metriikkien pohjautuvien tutkimusalueiden väliset suhteet (Holmberg, 2015, s. 15).

Tämän tutkielman taustateorian kannalta edellä mainituista tutkimusalueista bibliometriikan ja skientometriikan tutkimusalueet sisältävät keskeisimmät teoriat ja menetelmät. Tämän tutkielman tavoite ei ole edes yrittää yhtenäistää näiden kahden tutkimusalueen käsitteistöä ja terminologiaa, vaan tapauksesta ja käytettävästä teorettisesta pohjasta riippuen sovelletaan siihen pohjaan liittyvää käsitteistöä ja terminologiaa.

2.1.2 Keskeiset aiheet ja oletukset

Salinin (Greenfield & Greener, 2016, s. 132) mukaan alunperin bibliometriikan tavoite oli valvoa, kuvata ja mallintaa (akateemisen, erityisesti tieteellisen) tiedon tuotantoa, käyttöä ja levitystä. Edelleen Salinin mukaan ensimmäiset sovellukset kehitettiin optimoimaan kirjastosaatavuutta ja kiertoa, parantamaan bibliografisia tietokantoja ja laajentamaan informaatiopalveluja. Salinin mukaan tässä kontekstissa syntyivät 20. vuosisadalla bibliometriikan lait. Holmberg (2015, s. 17) esittelee nämä kolme bibliometriikan lakia, joita kutsutaan Lotkan, Bradfordin ja Zipfin mukaan. Lotkan laki ilmaisee Holmbergin mukaan sen, että kullakin tutkimusalueella suurin osa julkaisuista keskittyy pienelle joukoille tutkijoita. Bradfordin laki osoittaa Holmbergin mukaan sen, että suuri osa tutkimusalueen julkaisuista julkaistaan pienessä ydinjoukossa tieteellisiä aikakauslehtiä ja loput tutkimusalueen julkaisuista jakautuvat suurelle joukolle muita tieteellisiä aikakauslehtiä. Zipfin laki määrittää Holmbergin mukaan kussakin tekstissä esiintyvälle sanoille sanan esiintymislukumäärästä ja sanan laskevasta esiintymislukumäärän mukaisesta järjestysnumerosta lasketun kertolaskun tuloksen olevan tekstikohtainen vakio. Käytännön esimerkkinä tälle Zipfin laille Holmberg mainitsee "Moby Dick" tekstissä "the" sanan esiintymislukumäärän 14 169 kpl kerrottuna sen järjestysnumerolla 1 antavan suunnilleen saman lukuarvon kuin kertolasku "astronomical" sanan esiintymislukumäärällä 1 kpl ja sen järjestysnumerolla 16 789. Holmbergin mukaan tämä esimerkki kuvaa, kuinka suuri osa tekstin sanaesiintymistä kasautuu pienelle joukolle usein käytettyjä sanoja ja suuri osa kaikista tekstissä esiintyvistä sanoista esiintyy vain muutamia kertoja.

Millaisessa valossa näitä bibliometriikan lakeja pitäisi tulkita? Holmbergin (2015, s. 18) mukaan kaikki bibliometriset lait kuvaavat vahvasti vinoutuneita jakaumia, jossa muutamat tapaukset aiheuttavat suurimman osan vaikutuksesta ja suuri osa tapauksista aiheuttaa vain pienen osan vaikutuksesta. Edelleen Holmbergin mukaan tämä on tyypillistä potenssijakaumille (power law distribution). Potenssijakaumissa on Holmbergin (2015, s. 14) mukaan mielenkiintoista, että ne ilmenevät monen eri tyypillisen ilmiön yhteydessä. Esimerkkeinä hän mainitsee kaupunkien väkiluvun (harvoja

megakaupunkeja – lukuisia pieniä kaupunkeja), ihmisten varallisuuden (harvoja miljardöörejä – lukuisia vähävaraisia), maanjäristykset (harvoja voimakkaita maanjäristyksiä – lukuisia pieniä maanjäristyksiä), kirjojen myyntimäärät (harvoja bestsellereitä – lukuisia vähäisellä menekillä) sekä vierailut verkkosivuilla (harvoja miljoonien vierailujen verkkosivuja – lukuisia sivuja vähäisillä vierailumäärillä). Holmbergin mukaan potenssijakauma vaikuttaa olevan lähes universaali, luonnonvoimaa muistuttava, luonnollinen ilmiö miten asiat jakautuvat maailmassa. Yhteenvedon ja omana tulkintana todetaan bibliometriikassa tilastollisen analyysin paljastavan aineiston jakauman ja riittävän laajaa aineistoa tarkasteltaessa jakauman myös odotetaan jo ennalta noudattavan potenssijakaumaa ja oletetusta aineiston potenssijakaumasta johtuen merkittävimpien tapausten lukumäärän odotetaan rajautuvan pienehköön joukkoon koko aineiston tapauksiin verrattuna.

Skientometriikan perustajana pidetään Salinin (Greenfield & Greener, 2016, s. 132) mukaan Derek J. de Solla Price:ä. Salinin mukaan de Solla Price teki ensimmäisenä yhteisviittausanalyysiä (co-citation analysis) ja ehdotti malleja tällä tavoin viittauksista muodostuvien verkkojen tutkimiseen. Edelleen Salinin mukaan Eugene Garfield osaltaan perusti ISI:n (Institute for Scientific Information, nykyään osa Thomson Reutersia) ja kehitti myöskin maailman ensimmäisen monitieteellisen viittaustietokannan SCI:n (Science Citation Index), joka on yleinen skientometrinen tutkimusten aineistolähde. Salinin mukaan SCI:hin valittavien tieteellisten aikakauslehtien niiden ”koosta” riippumattomaa vertailua ja valintaa varten esiteltiin mittariksi IF:ää (impact factor) eli vaikuttavuuskerrointa. Myöhemmin Salinin mukaan Garfield tunnisti IF:n vahvuuden tieteellisten aikakauslehtien arvioinnissa ja piti sitä myös tieteellisen aikakauslehden vaikuttavuuden tai tason (performance) indikaattorina. Skientometriikan varsinaisen metodologian kehittymisen Salin (Greenfield & Greener, 2016, s. 132) kuvaa tapahtuneen 1970–80 luvuilla, jolloin tieteen rakenteen kartoittamiseen ehdotettiin yhteisviittausten analyysiä. Salinin mukaan ISI julkaisi yhteisviittauksiin perustuvan ”Atlas of Science”:n, jota pidettiin myös uudentyyppisenä ”katsauskirjallisuutena”. Salinin mukaan yhteisviittausten analyysin lisäksi Callon ja muut kehittivät myös toisen

kognitiivisen kartoitusmenetelmän ”Leximappe”, joka perustui yhteissana-analyysiin. Salinin mukaan näitä menetelmiä myöhemmin täydennettiin muilla ja niitä yhdisteltiin muiden tekstiin pohjautuvien (termien esiintymistaajuus) ja viittauksiin pohjautuvien (bibliografinen kytkentä, suora viittauslinkki, tekijän yhteisviittaus) tekniikoiden kanssa.

Holmbergin (2015, s. 26) mukaan skientometriikassa on alusta alkaen kritisoitu viittausten käyttöä tutkimuksen laadun mittarina johtuen lähinnä siitä, että viittaus voidaan luoda lukuisista eri syistä. Edelleen Holmbergin mukaan ideaalitulanteessa viittaus tarkoittaisi viittaavan julkaisun tekijän käyttäneen viitattua julkaisua ja viittauksen kuvaavan viitattun julkaisun laatua tekijän arvioimana. Edelleen Holmbergin mukaan kuitenkin viittauksia voidaan luoda myös kritiikin vuoksi, viittaukset voivat olla biasoituja tai niitä voidaan luoda itsekkäistä syistä. Holmberg esittää Smithin luettelon viittausten analyysiin liittyvistä perusoletuksista:

1. Viittaus merkitsee viitattun dokumentin käyttöä
2. Viittaus kuvaa arvoa (tai Smallin mukaan intellektuaalista velkaa)
3. Viittaukset tehdään usein parhaimpaan ja saatavilla olevaan aineistoon
4. Viitattut, yhteisviitattut ja bibliografisesti kytketyt dokumentit ovat sisällöltään yhteenkuuluvia (related)
5. Kaikki viittaukset ovat samanarvoisia.

Holmbergin (2015, s. 27) mukaan viittauksia ei välttämättä tehdä parhaisiin teoksiin johtuen esimerkiksi muista kannustimista viitata omiin teoksiin tai tekijä ei välttämättä ole tietoinen kaikesta tutkimuksesta, mikä voisi olla relevanttia. Edelleen Holmbergin mukaan laajoilla aineistoilla voimme kuitenkin olettaa viitattujen, yhteisviitattujen ja bibliografisesti kytkettyjen dokumenttien olevan sisällöltään yhteenkuuluvia ja käyttökelpoisia tieteen rakenteiden kartoitukseen. Smithin luettelon viimeisen oletuksen eli viittausten samanarvoisuuden suhteen Holmberg esittelee kaksi näkökulmaa eli ensinnä ovatko (dokumentin) kaikki lähdeviittaukset samanarvoisia ja toiseksi ovatko kaikki (dokumenttiin) kohdistuvat viittaukset samanarvoisia. Lähdeviittausten osalta samanarvoisuuden olettamisen ongelmallisuutta osoittaakseen Holmberg antaa esimerkin, jossa kolmesta viitattusta lähteestä vain yhden varaan rakennetaan ja sitä

kohden synty ”intellektuaalista velkaa” ja samalla kahteen muuhun viitataan vain vertailun vuoksi käyttämättä niiden sisältöä. Edelleen Holmbergin mukaan viittausten laskennassa näillä kaikilla kolmella lähteellä olisi silti sama painoarvo. Dokumenttiin kohdistuvien viittausten samantarvoisuuden ongelmallisuuden osalta Holmberg esittää Frandsenin ja Nicolaisenin osoittaman tuloksen, että yhtäkkinen kasvu huomiossa ja viittauksissa yksittäiseen artikkeliin (Nobel-palkinnon saamisesta johtuen) vaikutti myös artikkelin lähdeviittausten kohteena olleiden artikkelien viittausten kokonaismäärään aiheuttaen eräänlaisen vaikuttavuuden heijastusvaikutuksen (ripple effect). Holmbergin mukaan voidaan kyseenalaistaa vaikuttaisiko viittausanalyysissä laskennan kannalta samantarvoisena käsiteltävä viittaus tuntemattomamman tekijän artikkelin lähdeluettelossa kohteena olevien artikkelien viittausten kokonaismäärään vastaavasti eli ovatko viittaukset kuitenkin samantarvoisia.

Millaisessa valossa näitä viittauksiin liittyä kritiikkiä ja viittauksiin liittyviä oletuksia pitäisi tulkita? Viittauksiin liittyvästä kritiikistä ja oletuksista on hyvä olla tietoinen, mutta yhtenä käytännöllisenä näkökulmana voidaan pitää Holmbergin (2015, s. 27) yhteenvetona esittämää toteamusta viittausten tavanomaisen käytön kuitenkin olevan pääasiassa aiemman tutkimuksen arvon tunnustamista ja laajalla aineistolla muista syistä tehdyt viittaukset ”katoavat taustaan” tai suodattuvat analyysin myötä. Toisaalta yhtenä mahdollisena julkaisuihin ja niiden sisältämiin viittauksiin liittyvänä taustalla vaikuttavana haasteena voidaan havaita Caspin ja muiden (2000) eräessä julkaisunsa versiossa toteaman tilaongelman: ”Tilarajoituksista johtuen tässä (extended abstract) ei voida antaa asianmukaista tunnustusta kaikille vaikutteille”. Tällöin lukija jää pohtimaan mitä nämä tilanpuutteen vuoksi tässä tapauksessa pois jätetyt, mutta tutkijoiden mielestä tunnustusta ansaitsevat vaikutteet (lähteet) mahtavat olla ja olisivatko ne olleet lukijan jatkotutkimuksen ja tutkimusalueen hahmottamisen kannalta merkittäviä. Joka tapauksessa julkaisujen sisältöön ja sisällön vertailuun perustuvien analyysimenetelmien eli bibliometrisen analyysin ja LLM-pohjaisien työkalujen voisi ajatella tuovan jossain määrin työkaluja myös pois jätettyjen vaikutteiden (lähdeviittausten) tunnistamiseen

julkaisujen välillä ja siinä mielessä helpottavan tällaistaikin tilanpuutteesta johtuvaa viittauksiin liittyvää mahdollista haastetta.

2.1.3 Bibliometrisen analyysin rakenne ja toimintaperiaate

Donthu ja muut (2021) määrittävät bibliometriselle analyysille seuraavat neljä etenemisaskelta:

1. Bibliometrisen analyysin tavoitteiden ja laajuuden määrittäminen,
2. Bibliometrisessä analyysissä käytettävien tekniikoiden valinta,
3. Bibliometrisessä analyysissä käytettävän aineiston hankinta,
4. Bibliometrisen analyysin suorittaminen ja löydösten raportointi.

Ensimmäisen etenemisaskeleen osalta tavoitteiden tulisi liittyä heidän mukaansa retrospektioon eli taaksepäin katsovan tarkasteluun kohteena olevan tutkimusalueen vaikuttavuudesta ja tasosta (performance) sekä tutkimusalueella tehtävästä tieteestä. Edelleen Donthun ja muiden mukaan vaikuttavuuden osalta analyysi pyrkii usein selvittämään tutkimusalueen tuottoisia elementtejä ja nämä elementit voivat sisältää tekijöitä, instituutioita, maita ja tieteellisiä aikakauslehtiä. Edelleen Donthun ja muiden mukaan tieteen osalta analyysi pyrkii tyyppillisesti paljastamaan sen bibliometrisen rakenteen, joka koteloi tutkimuselementtien muodostamat verkostot. Tässä he tarkoittavat tutkimuselementeillä sellaisia elementtejä, jotka osallistuvat sen intellektuaalisen rakenteen muodostamiseen, joka rakentuu tutkimusalueen relevanteista aiheista muodostuneiden klusterien päälle. Laajuuden osalta Donthun ja muiden mukaan bibliometrinen analyysi on tarkoitettu laajoille aineistoille ja sen käyttö pienille, esimerkiksi alle 500 julkaisun aineistolle olisi ylilyönti ja heidän mukaansa tällaiselle pienemmälle aineistolle muut menetelmät kuten meta-analyysi tai systemaattinen kirjallisuuskatsaus voisivat soveltua paremmin.

Toisen etenemisaskeleen osalta Donthun ja muiden (2021) mukaan valitaan ensimmäisen etenemisaskeleen tavoitteiden ja laajuuden näkökulmasta soveltuvat tekniikat bibliometriselle analyysille. He suosittelevat valitsemaan ensin bibliometrisen

tekniikan ja vasta sitten valmistelemaan sen tarvitseman bibliometrisen aineiston. Edelleen Donthun ja muiden ensimmäisessä esimerkissä tavoitteena on esittää katsaus tutkimusalueesta menneisyyden, nykytilan ja tulevaisuuden näkökulmasta ja tällöin työkaluiksi valitaan yhteisviittausanalyysi (menneisyys), bibliografinen kytkentä (nykytila) ja yhteissana-analyysi julkaisujen tulevaisuutta koskevista tekstiosioista (tulevaisuus, esimerkiksi julkaisujen tekstiosiot ”implications” ja ”future research directions”).

Kolmannessa etenemisaskeleessa Donthun ja muiden (2021) mukaan kerätään toisessa etenemisaskeleessa valittuja bibliometrisiä analyysitekniikoita varten tarvittava aineisto. Heidän mukaansa tällöin määritetään kirjallisuutta tai asiantuntijoita hyödyntämällä sellaiset hakutermit, joilla saadaan kerättyä samanaikaisesti riittävän laaja ja kuitenkin ensimmäisen etenemisaskeleen asetetun tavoitetutkimusalueen kannalta riittävän kohdistettu aineisto. Edelleen Donthun ja muiden mukaan useiden eri tietokantojen käyttö voi vaatia työtä aineistojen yhdistämisessä erilaisista aineistoformaateista ja duplikaateista johtuen ja tästä syystä he suosittelevat käyttämään yhtä tietokantaa. Edelleen heidän mukaansa riippuen analyysissä käytettävistä tietokentistä aineistoa voi lisäksi joutua puhdistamaan, koska joissakin tietokentissä (esimerkiksi affiliation) voi olla systemaattisia virheitä.

Neljännessä etenemisaskeleessa Donthun ja muiden (2021) mukaan suoritetaan aineistolle bibliometrinen analyysi ja kirjoitetaan bibliometrinen katsaus. Heidän mukaansa nämä toimet kuuluvat siinä mielessä samaan etenemisaskeleeseen, että usein näitä toimia iteroidaan lopputuloksen parantamiseksi. Edelleen Donthun ja muiden mukaan kirjoitustyyliin tulee huomioida kohdeaikakauslehti tai kohdetutkimusalue ja hakea mallia esimerkiksi aiemmista kohteen mukaisista katsausartikkeleista. Lisäksi he suosittelevat keskusteluosiossa luomaan yhteyttä relevantteihin trendeihin ja suosittelevat käyttämään bibliometrisiä visualisointeja ja taulukoita, jotta keskustelu olisi enemmän analyttistä kuvaamisen sijaan.

2.1.3.1 Bibliometrisen analyysin tekniikat

Donthun ja muiden (2021) mukaan bibliometrisen analyysin tekniikat ilmenevät kahdessa kategoriassa: (1) vaikuttavuuden ja tason (performance) analyysi sekä (2) tiedekartoitus (science mapping). Edelleen Donthun ja muiden mukaan vaikuttavuuden analyysi tarkastelee tutkimusalueella tutkimusta tekevien osapuolien (esimerkiksi tekijät, instituutiot, valtiot ja tieteelliset aikakauslehdet) panokseen tutkimusalueella. Heidän mukaansa vaikuttavuuden analyysi on hyvin yleistä myös sellaisissa katsauksissa, joissa ei tehdä tiedekartoitusta. Heidän mukaansa vaikuttavuuden analyysia varten on lukemattomia mittareita ja seuraavissa taulukossa 1 esitellään näitä mittareita.

Taulukko 1. Vaikuttavuuden ja tason (performance) mittareita Donthun ja muiden (2021) mukaan.

Mittarityyppi	Mittarit
Julkaisuun liittyvät	Julkaisujen kokonaismäärä, julkaisuun panostaneiden tekijöiden määrä, yhden tekijän julkaisut, yhteistyössä julkaistu, aktiiviset julkaisuvuodet, tuottavuus aktiivista julkaisuvuotta kohden
Viittauksiin liittyvät	Viittausten kokonaismäärä, viittausten keskiarvoja kuten viittausten määrä per julkaisu ja viittausten määrä per vuosi
Julkaisuun ja viittauksiin liittyvät	Yhteistyöindeksi, Yhteistyökerroin, viitattujen julkaisujen määrä, osuus viitatuista julkaisuista, viittaukset viitattua julkaisua kohden, h-indeksi, g-indeksi, i-indeksi (i-10, i-100, i-200)

Tiedekartoitus puolestaan tarkastelee Donthun ja muiden (2021) mukaan tutkimuksen rakenneosien välisiä suhteita. Heidän mukaansa analyysi koskee intellektuellia interaktiota ja rakenteellisia yhteyksiä tutkimuksen rakenneosien välillä. Edelleen heidän mukaansa näitä tekniikoita ovat viittausanalyysi, yhteisviittausanalyysi, bibliografinen kytkentä, yhteissana-analyysi sekä yhteistekijäanalyysi ja näitä tekniikoita esitellään seuraavassa taulukossa 2. Heidän mukaansa nämä tekniikat yhdistettynä

verkkoanalyysiin (network analysis) on instrumentaalinen esitettäessä tutkimusalueen bibliometristä rakennetta ja intellektuaalista rakennetta.

Taulukko 2. Tiedekartoituksen tekniikoita Donthun ja muiden (2021) mukaan.

Tekniikan tyyppi	Kuvaus
Viittausanalyysi	Julkaisujen väliset suhteet, vaikutusvaltaisimmat julkaisut.
Yhteisviittausanalyysi	Suhteet viitattujen julkaisujen välillä, perustavanlaatuiset teemat.
Bibliografinen kytkentä	Suhteet viittaavien julkaisujen välillä, aikakaussittaiset tai nykyiset teemat.
Yhteissana-analyysi	Nykyiset tai tulevaisuuden suhteet aiheiden välillä, kirjoitettu sisältö (sanat).
Yhteistekijäanalyysi	Sosiaaliset interaktiot tai suhteet tekijöiden välillä, tekijöiden ja tekijän kytkökset (instituutiot, valtiot).
Muita tekniikoita	Verkkometriikka, klusterointi, visualisointi

Donthun ja muiden (2021) mukaan viittausanalyysi on tiedekartoituksen perustyökalu ja sen toiminta perustuu siihen oletukseen, että viittaukset kuvastavat intellektuaalisia linkkejä julkaisujen välillä, jotka syntyvät julkaisun viitatessa toiseen julkaisuun. Edelleen Donthun ja muiden mukaan viittausanalyysissä julkaisun vaikuttavuus määräytyy siihen viittaavien viittausten lukumäärästä ja tämän kautta viittausanalyysi pystyy toteamaan tutkimusalueen vaikutusvaltaisimmat julkaisut ja saamaan ymmärrystä tutkimusalueen intellektuaalisesta dynamiikasta. Edelleen Donthun ja muiden mukaan yhteisviittausanalyysi on tiedekartoituksen työkalu, joka olettaa usein yhdessä viitattujen julkaisujen olevan temaattisesti samankaltaisia. Edelleen Donthun ja muiden mukaan yhteisviittauserkossa kahdella julkaisulla on yhteys, jos ne esiintyvät yhdessä jonkun muun julkaisun lähdeluettelossa. Heidän mukaansa yhteisviittausanalyysillä voidaan löytää vaikutusvaltaisimpien julkaisujen lisäksi myös temaattisia klustereita, jotka perustuvat viitattuihin julkaisuihin. Edelleen Donthun ja muiden mukaan

bibliografinen kytkentä on tiedekartoituksen työkalu, joka olettaa kahden yhteisiä lähteitä käyttävän julkaisun olevan myös sisällöltään samankaltaisia. Heidän mukaansa bibliografisessa kytkennässä julkaisut jaetaan temaattisiin klustereihin viittaavien julkaisujen pohjalta ja se soveltuu paljastamaan laajan spektrin teemoja ja viimeaikaisia kehityskulkuja.

Donthun ja muiden (2021) mukaan kolme edeltävää tiedekartoituksen tekniikkaa keskittyvät julkaisuihin, kun taas yhteissana-analyysissä analyysin kohteena ovat sanat ja yhteissana-analyysi tarkastelee itse julkaisun sisältöä. Heidän mukaansa yleensä analyysi kohdistuu tekijän avainsanoihin, mutta näiden lisäksi voidaan käyttää sanoja myös julkaisun otsikosta, abstraktista tai koko julkaisun tekstistä. Edelleen Donthun ja muiden mukaan yhteissana-analyysissä oletetaan, että usein yhdessä esiintyvillä sanoilla on temaattinen suhde toistensa kanssa.

Donthun ja muiden (2021) mukaan yhteistekijäanalyysi tarkastelee tutkijoiden välistä interaktiota tutkimusalueella. Heidän mukaansa tutkimuksessa kasvavan metodologisen ja teoreettisen monimutkaisuuden vuoksi yhteistekijäisyys on tullut tavanomaiseksi. Edelleen Donthun ja muiden mukaan yhteistyötä tekevät tutkijat muodostavat ”näkymättömäksi kollaasiksi” nimitetyn verkoston, jonka tutkiminen voi edesauttaa kehittämään tutkimusalueen hankkeita. Heidän mukaansa analyysi voi myös varustaa uusia tutkijoita arvokkaalla informaatiolla vakiintuneista ja trendaavista tutkijoista heidän tavoittamiseksi ja yhteistyön tekemiseksi.

Holmbergin (2015, s. 22) mukaan Borgman ja Furner tekevät viittausten analysoinnin kannalta eron viittausten muodostamien linkkien relaatioanalyysin ja evaluoivan analyysiin välillä. Edelleen Holmbergin mukaan relaatioanalyysissä kiinnostus kohdistuu tutkittavien elementtien välisiin yhteyksiin ja linkkien lukumäärä indikoi vahvempaa relaatiota. Holmberg (2015, s. 25) kuvaa viittausten analysoinnissa yhteisviittausanalyysin ja bibliografisen kytkennän kuuluvan relaatioanalyysin alle ja esittää yhtenä esimerkkinä käytännön sovelluksesta julkaisujen kanssa samankaltaisten

julkaisujen paikantamisen. Holmberg toteaa myös, että mahdollisesti bibliografinen kytkentä saattaa antaa kaikkein tarkimman kuvan tiedekartoituksessa. Evaluoivan viittausten analyysin puolesta Holmbergin (2015, s. 22) kuvaa sen keskittyvän osaltaan käyttämään viittausten lukumäärää indikaattorina arvosta, vaikutuksesta tai näkyvyydestä ja tavoitteena on asettaa järjestykseen kenen tai keiden työ on parempaa tai sillä on ollut suurempi vaikutus.

2.1.3.2 Tietokannat ja ohjelmistot

Vuonna 2016 julkaistussa teoksessa Salinin (Greenfield & Greener, 2016, s. 134) mukaan Web of Science (ISI, Thomson Reuters), SCOPUS (Elsevier) ja Google Scholar olivat kaikkein relevanteimmat monitieteiset tietokannat. Edelleen Salinin mukaan Google Scholar on muita kahta tietokantaa kattavampi, mutta sen sisältämän datan laatu on heikompi. Lindelöw ja muut (2025) puolestaan selvittivät eri tietokantojen yleisyyttä bibliometrisissä julkaisuissa ja heidän aineistossaan Web of Science oli yleisin bibliometrisen tutkimuksen tietolähde. Edelleen Lindelöwin ja muiden mukaan heidän aineistossaan toiseksi yleisimmin käytetty oli SCOPUS. Edelleen Lindelöwin ja muiden mukaan Google Scholar ei ole saavuttanut SCOPUS-tietokannan käyttöön verrattavissa olevaa käyttömäärää bibliometrisen tutkimuksen yhteisössä ja heidän mukaansa selittäväenä tekijänä voivat olla huolet Google Scholarin sisältämän datan laadun suhteen sekä kyseisen tietokannan sisällön kirjavuus verrattuna Web of Science- ja SCOPUS-tietokantoihin, mikä johtaa vaikeuksiin vertailuissa.

Vargas ja muut (2022) selvittivät kirjallisuudesta bibliometrisen analyysin ohjelmistoja ja luettelivat niistä seuraavat aktiivisesti kehityksen alla olevat ohjelmistot: "Bibexcel", "Bibliometrix", "BiblioTools", "CATAR", "CiteSpace", "CitNetExporer", "CRExplorer", "Headstart", "Publish or Perish", "RobotReviewer", "SciMAT", "Scopus API R code" ja "VOSviewer". Edelleen Vargas ja muut selvittivät näiden ohjelmistojen käytön yleisyyttä tieteellisissä julkaisuissa ja heidän 1246 julkaisun aineistossaan yleisimmin käytetyt ohjelmistot olivat yleisyyden mukaan järjestettynä: VOSviewer (716 kpl), CiteSpace (415 kpl), Bibliometrix (128 kpl) sekä SciMAT (52 kpl).

2.1.3.3 Haasteet ja avoimet kysymykset

Donthun ja muiden (2021) mukaan bibliometrisen analyysin haasteena ovat mahdollisten virheiden esiintyminen aineistona käytetyissä tietokannoissa kuten tietokantatietuiden duplikaatit tai virheitä sisältävät tietokantatietueet. Edelleen Donthu ja muut toteavat bibliometrisen analyysin tuottavan kvantitatiivista tietoa, mutta analyysin perusteella esitetyt laadulliset väittämät voivat olla hyvin subjektiivisia ja kvantitatiivisten tulosten ja laadullisten tulosten välinen suhde on usein epäselvä. Edelleen Donthun ja muiden mukaan tällaisten laadullisten väittämien esittämisessä tulisi olla erityisen varovainen ja täydentää niitä soveltuvin osin esimerkiksi sisältöanalyysillä. Lisäksi Donthu ja muut toteavat bibliometrisen analyysin kykenevän antamaan vain lyhyen aikavälin ennusteen tutkimusalueen tulevaisuudesta ja he neuvovat tutkijoita välttämään tekemästä ylimitoitettuja väitteitä tutkimusalueesta ja sen vaikuttavuudesta pitkällä aikavälillä.

2.1.4 Aiempi käyttö tutkimuksessa

Holmbergin (2015, s. 10) mukaan kvantitatiivisten menetelmien tarve tutkimuksen arvioinnissa on kasvanut ja sitä myötä myös kiinnostus bibliometriikkaa kohtaan on kasvanut. Seuraavassa taulukossa 3 esitetään tässä tutkielmassa selvitettyjä SCOPUS-tietokannasta löytyvien bibliometriikkaan ja skientometriikkaan liittyvien julkaisujen lukumääriä ja julkaisu vuosia.

Taulukko 3. Bibliometriikkaan ja skientometriikkaan liittyvien julkaisujen lukumäärät ja julkaisu vuodet SCOPUS-tietokannassa.

Aineiston hakusana	Julkaisuja	Julkaisu vuodet
bibliom*	70 670	1938 – 2025
scientometr*	11 444	1976 – 2025
bibliom* AND scientometr*	4 764	1976 – 2025

2.1.5 Soveltaminen tässä tutkielmassa

Edeltävien lukujen esittelyyn perustuen bibliometriikan ja skientometriikan soveltamisen edellytyksenä tutkimuksessa on oikeastaan vain tutkimuksen kohteena olevan kirjallisen aineiston saatavuus. Tässä tutkielmassa päädyttiin soveltamaan bibliometristä analyysiä SCOPUS-tietokannasta saatavilla olevaan aineistoon.

Vaikka edeltävien lukujen esittelyn perusteella bibliometriikan ja skientometriikan todettiin olevan julkaisumäärältään laajoja tutkimusalueita, niiden soveltaminen hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan yhteydessä vaikuttaa olevan hyvin harvinaista. Seuraavassa taulukossa 4 esitetään SCOPUS-tietokannasta selvitettyjen bibliometriikkaan, skientometriikkaan ja tutkielman kahteen kohdetutkimusalueeseen liittyvien julkaisujen hyvin alhaiset lukumäärät. Tämä tutkielma tuo osaltaan lisäyksen bibliometriikan soveltamiseen näiden tutkimusalueiden yhteydessä.

Taulukko 4. Bibliometriikkaan, skientometriikkaan ja tutkielman kahteen tutkimusalueeseen liittyvien julkaisujen määrät ja julkaisuvuodet SCOPUS-tietokannassa.

Aineiston hakusana	Julkaisuja	Julkaisuvuodet
bibliom* AND hyperspectr*	32	2016 – 2025
bibliom* AND fpga*	2	2021 – 2025
scientometr* AND hyperspectr*	2	2021 – 2024
scientometr* AND fpga*	2	2019 – 2025

Edellä on ensinnä todettu bibliometriikan ja skientometriikan olevan yhteensopiva tutkielman aineiston analysoinnin näkökulmasta ja toisaalta todettu tutkielma myös tarpeelliseksi johtuen bibliometriikan ja skientometriikan edelleen vähäisestä soveltamisesta tutkielman aihealueella. Kolmanneksi on syytä todeta taustateorioiden mukana tutkielmaan tuleva taustaoletus eli tutkielman aineiston oletetaan noudattavan aiemmin esiteltyä potenssijakaumaa. Tutkielman aineistosta oletetaan siis bibliometrisen ja skientometrisen analyysin perusteella löytyvän kaikista tarkastelluista tapauksista se pieni joukko tapauksia, joilla on suurin vaikutus.

Donthun ja muiden (2021) esittämän rakenteen mukaisesti tämän tutkielman tavoitteena on paljastaa bibliometrisen analyysin keinoin kahden valitun tutkimusalueella tehdyn tieteen rakennetta ja laajuuden puolesta aineiston määrä on riittävä bibliometrisen analyysin tarkoituksenmukaisuutta ajatellen. Aineistoa kuvaavia tarkempia lukuarvoja esitetään jäljempänä.

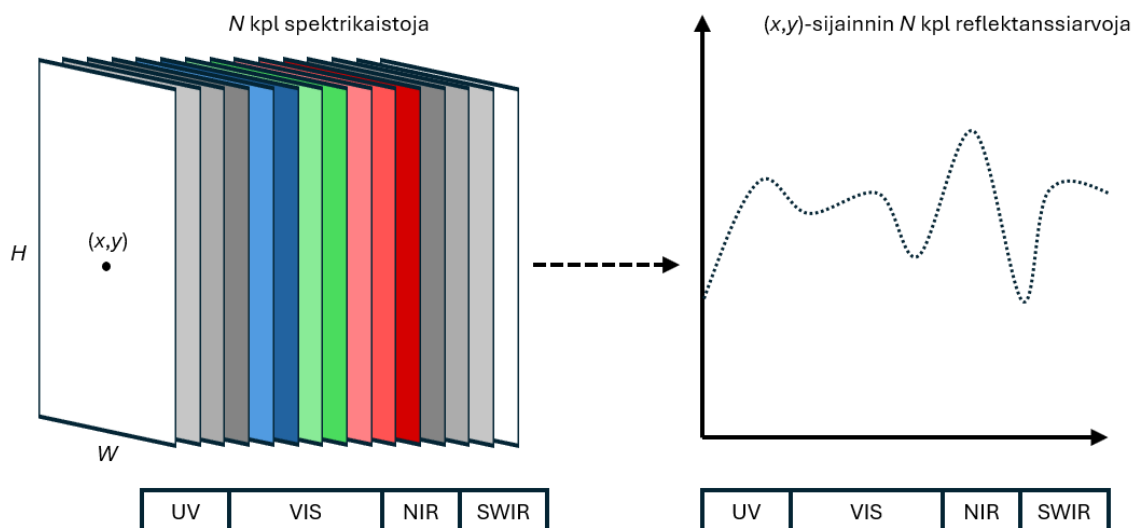
2.2 Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue

2.2.1 Yleinen esittely

Hongin ja muiden (2026) mukaan hyperspektrikuvantaminen (HSI, hyperspectral imaging) on kehittynyt optinen havainnointitekniikka, joka koostaa spektroskopian ja digitaalisen kuvantamisen yhdeksi järjestelmäksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tämä integrointi mahdollistaa samanaikaisen spatiaalisen tiedon ja spektritiedon tiedonkeruun kaappaamalla havaintopisteiden sijainnit määrittäviä kuvia (spatially resolved images) lukuisien jatkuvien (eli peräkkäisien) spektrikaistojen yli. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tällöin kullakin kaapatun näkymän pikselillä on uniikki spektrisignatuuri, jota yleensä kutsutaan ”sormenjäljeksi”. Edelleen Hongin ja muiden mukaan nämä pikselitason spektrit strukturoidaan hyperspektrikuutioksi nimitetyksi kolmiulotteiseksi datasetiksi, joka yhdistää kaksi spatiaalista ulottuvuutta ja yhden spektriulottuvuuden eli käytännössä yhdistää tällä tavoin perinteisen kuvantamisen ja spektroskopian. Edelleen Hongin ja muiden mukaan hyperspektrikuutio sisältää rikkaan spektritiedon mitaten reflektanssin tai radianssin hienojakoisten spektri-intervallien yli. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tällainen yksityiskohtainen spektrisisältö mahdollistaa materiaalien, biologisen kudoksen ja maaperän tai luonnonympäristön pintojen (environmental surfaces) tarkan identifioinnin ja perusteellisen karakterisoinnin.

Hongin ja muiden (2026) mukaan HSI keskittyy elektromagneettisen spektrin optisen ikkunan alueelle kattaen tyypillisesti 380-2500 nm. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tämä ikkuna sisältää näkyvän valon (400-700 nm), lähi-infrapun (NIR, near-infrared) ja

lyhytaaltoisen infrapunaa (SWIR, shortwave infrared) alueet. Edelleen Hongin ja muiden mukaan etenkin 380-400 nm alueen inkluusio parantaa edelleen herkkyyttä pigmentin absorptiolle ja hienovaraisille pinnan reflektanssin variaatioille erityisesti violetin ja lähi-ultravioletin alueella. Seuraava kuva 2 esittelee hyperspektrikuution, optisen ikkunan alueen kaistat ja yhdelle pikselille muodostuvan spektrisignatuurin eli ”sormenjäljen”.



Kuva 2. Vasemmalla hyperspektrikuutio ja oikealla yhdelle pikselille eli (x,y) -sijainnille muodostuva mitatuista reflektanssi- tai radianssiarvoista muodostuva spektrisignatuuri eli ”sormenjälki”.

Hongin ja muiden (2026) mukaan pankromaattinen kuvausjärjestelmä tallentaa laajan spektrikaistan sisältäen koko näkyvän spektrin alueen ja tuottaa korkean spatiaalisen resoluution, mutta vain minimaalisen spektrierottelun. Edelleen Hongin ja muiden mukaan standardit RGB-kamerat tallentavat tyypillisesti vain kolme laajaa spektrikaistaa ja multispektrijärjestelmät kaappaavat tyypillisesti alle 20 erillistä spektrikaistaa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tätä vastoin yli 100 jatkuvan spektrikaistan kautta rikasta spektritietoa tuottava HSI mahdollistaa hienovaraisen, mutta diagnostisesti merkittävien piirteiden (feature) identifioinnin, sisältäen molekyylien absorptiokaistat ja pigmenttiin liittyvät transiitit. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI:n korkeaulotteinen luonne on peräisin fundamentaalisista fysikaalisista vuorovaikutuksista kohteeseen osuvan säteilyn ja kohteen materiaalien välillä sisältäen elektronien

transitiot, molekyylien värähdysliikkeet, sironnan (scattering) ja fluoresenssin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näiden kuvantamismenetelmän ja spektrialueen mukaan vaihtelevat vuorovaikutukset ovat perusteena HSI:n uniikille kyvyille tarjota ei-destruktiivisia ja merkkiaineettomia analyysejä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI on uniikissa asemassa tutkia pinnan ominaisuuksien lisäksi myös pinnanalaisia (subsurface) ominaisuuksia monenlaisilla tieteellisillä ja käytännön sovellusten alueilla.

Hongin ja muiden (2026) mukaan HSI:n juuret ovat kaukokartoituksessa (remote sensing) eli erityisesti ilmasta ja avaruudesta käsin tapahtuvassa maapallon havainnoinnissa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan optiikan, antureiden ja laskennallisen kuvantamisen kehitys ovat olleet HSI-järjestelmien miniaturisoinnin ja diversifioinnin taustalla. Edelleen Hongin ja muiden mukaan nykyään HSI-laitteita löytyy satelliiteista, droneihin asennettavista kameroista, laboratoriomikroskoopeista ja kannettavista vierianalytiikan instrumenteista (portable point-of-care instrument). Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI:n etuja ovat sen sopivuus *in situ* ja *in vivo* sovelluksiin tehden siitä houkuttelevan vaihtoehdon jatkuvaan monitorointiin, reaaliaikaiseen diagnostiikkaan ja automaatioon. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI kaappaa sekä spatiaalisia patterneja että spektrisormenjälkiä, joka mahdollistaa sen soveltamisen kasvitautien tunnistamiseen, kirurgiseen ohjaukseen, väärennösten tunnistamiseen ja geologiseen kartoitukseen.

Hongin ja muiden (2026) mukaan HSI-datan luonnostaan korkeaulotteinen luonne asettaa merkittäviä haasteita sen prosessoinnille ja tulkinalle. Edelleen Hongin ja muiden mukaan klassiset tilastolliset menetelmät kuten PCA (principal component analysis) ja LDA (linear discriminant analysis) ovat edelleen laajasti käytössä ulottuvuuksien redusointiin ja piirteiden ekstraktioon (feature extraction). Edelleen Hongin ja muiden mukaan rajallisesta spatiaalisesta resoluutiosta ja kompleksisesta pinnan heterogeenisyydestä johtuvan spektrisen sekoittumisen (spectral mixing) ratkaisussa spektrinen erottelu (spectral unmixing) purkaa sekoittuneet pikselit siinä olevien pääkomponenttien spektreihin (endmember spectra) ja niiden osuuksiin mahdollistaen tarkan materiaalin identifioinnin ja karakterisoinnin alipikselin tasolla.

Edelleen Hongin ja muiden mukaan koneoppiminen ja tekoäly (konvoluutioneuroverkko, spectral-spatial arkkitehtuurit, itseohjattu oppiminen sekä transformer-perusteiset mallit) ovat selvästi kehittäneet kyvykkyyttä luokittelussa, anomalian tunnistuksessa ja kohteen lokalisoinnissa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan viime aikoina monipuolisella ja laajamittaisella aineistolla koulutetut perusmallit (foundation models) ovat osoittaneet potentiaalia generalisoida erilaisten taskien, sovellusalueiden ja sensorityyppien yli ja kaiken kaikkiaan tällaiset tekoälynatiivit lähestymistavat ajavat paradigman muutosta hyperspektridatan hyödyntämisessä.

2.2.2 Keskeiset aiheet ja oletukset

Hong ja muut (2026) kuvaavat ensinnä työnkulun liittyen hyperspektrisen kuvantamisjärjestelmän prosessiputkeen (HSI pipeline) ja toiseksi työnkulun liittyen hyperspektriseen data-analyysiin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI-prosessiputken työnkulku alkaa kuvattavasta näkymästä tai kohteesta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tästä kohteesta heijastunut tai siitä säteilevä valo etenee optisen kokoonpanon läpi, joka kerää ja kohdistaa sisääntulevan säteilyn kuvantavaa spektrometriä kohti. Edelleen Hongin ja muiden mukaan spektrometri erottelee säteilyn spatiaalisesti lukuisiin jatkuviin (eli peräkkäisiin) spektrikaistoihin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan nämä spektrisesti hajautetut signaalit kaapataan detektorimatriisiin (tai anturin) avulla, joka muuttaa optisen informaation mitattaviksi sähköisiksi signaaleiksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan lopuksi raaka data muunnetaan esikäsittelyvaiheen kautta jatkoanalyysiä varten standardimuotoiseksi digitaaliseksi kuvaksi.

Hongin ja muiden (2026) mukaan optinen kokoonpano koostuu linseistä, peileistä tai niiden yhdistelmästä ja se määrittää kriittisiä kuvantamisen parametreja kuten näkökenttä (FOV, field of view), pistevaste (PSF, point spread function), spatiaalinen resoluutio ja spektrialue. Edelleen Hongin ja muiden mukaan korkealaatuinen optinen design on kriittinen sen vähentäessä kromaattisia ja geometrisia vääristymiä ja takaa tarkan ja luotettavan spatiaalisten yksityiskohtien säilymisen ja spektriominaisuuksien muuttumattomuuden tiedonkeruussa.

Hongin ja muiden (2026) mukaan kuvantava spektrometri on HSI-järjestelmässä se ydinkomponentti, joka erottaa HSI-järjestelmät perinteisistä optisista kuvantamismenetelmistä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan sen ensisijainen tehtävä on spektrisesti hajottaa sisääntulevan säteilyn lukuisiin kapeisiin ja jatkuviin (eli perättäisiin) aallonpituuskaistoihin generoiden yksityiskohtaiset spektrisignatuurit jokaiselle spatiaaliselle lokaatiolle (tai kuvapikselille). Edelleen Hongin ja muiden mukaan spektrometrissä sen spektriresoluutio eli sen kyky erotella lähellä toisiaan olevia aallonpituuksia on erittäin tärkeä tarkalle materiaalien ja kohteiden identifioinnille, erottelulle ja karakterisoinnille. Edelleen Hongin ja muiden mukaan spektrierotteluun on useita tapoja kuten diffraktiohila, prismaan perustuvat järjestelmät ja elektronisesti säädetyt suodattimet. Edelleen Hongin ja muiden mukaan diffraktiohilat erottelevat aallonpituudet diffraktiokulman mukaan ja tuottavat korkean spektriresoluution ja erinomaisen mekaanisen stabiiliuden. Edelleen Hongin ja muiden mukaan prismat hajottavat sisääntulevan säteilyn aallonpituudesta riippuvan taittumisen (refraction) mukaan ja vaikkakin ne ovat robusteja ja stabiileja kuitenkin niiden epälineaarinen dispersiokarakteristiikka hankaloittaa tarkkaa spektrikalibrointia. Edelleen Hongin ja muiden mukaan elektronisesti säädettävät suodattimet toteuttavat spektrierottelun moduloimalla dynaamisesti optisia ominaisuuksia esimerkiksi LCTF:n (liquid crystal tunable filter) tapauksessa kaksoistaittumisella (birefringence) ja AOTF:n (acousto-optic tunable filter) tapauksessa akustisella interaktiolla.

Hongin ja muiden (2026) mukaan anturi tai detektorimatriisi kaappaa spektrisesti hajautetun optisen säteilyn ja muuttaa sen mitattaviksi elektronisiksi signaaleiksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan CCD (charge-coupled device) ja CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) ovat kaksi yleistä detektoritekniikkaa ja kummallakin on erityiset vahvuutensa liittyen herkkyyteen, kvanttihyötysuhteeseen, dynaamiseen alueeseen ja kohinakaracteristiikkaan. Edelleen Hongin ja muiden mukaan detektoritekniikan valinta vaikuttaa suoraan järjestelmän kriittisiin metriikoihin kuten SNR (signal-to-noise ratio), radiometrinen tarkkuus ja datan laatu kokonaisuudessaan.

Hongin ja muiden (2026) mukaan digitaalisessa kuvantamisessa kuvantamisgeometrian käsite viittaa kohteen ja kuvatasossa ilmenevän representaatioon väliseen suhteeseen, mutta tätä vastoin HSI-järjestelmässä kuvantamisgeometria tarkoittaa eri skannausmenetelmiä tiedonkeruussa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan neljä ensisijaista skannausmenetelmää ovat line-scanning (pushbroom), point-scanning (whiskbroom), snapshot scanning ja staring scanning. Edelleen Hongin ja muiden mukaan line-scanning tallentaa spektri-informaation samanaikaisesti yhtä spatiaalista riviä kohden ja kuvantamisalustan (satelliitti, lentokone tai droni) liikuessa perättäiset rivit muodostavat kaksiulotteisen kuvan. Edelleen Hongin ja muiden mukaan point-scanning käyttää mekaanisesti liikutettavia skannauspeilejä tai kääntyviä prismoja yksittäisten pikseleiden kaappaamiseen peräkkäisillä ajanhetkillä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan snapshot scanning kaappaa samanaikaisesti spatiaalisen ja spektraalisen tiedon yhdellä valotuksella perustuen kehittyneisiin laskennallisiin optisiin menetelmiin kuten coded aperture ja mikrolinssimatriisi yhdistettynä dispersiivisiin elementteihin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan staring scanning kaappaa spektrikaistat peräkkäisillä ajanhetkillä käyttäen elektronisesti säädettäviä filttäreitä.

Hongin ja muiden (2026) mukaan tarkka hyperspektrisen datan tiedonkeruu vaatii systemaattisia prosessointi- ja kalibrointimenettelyjä ennen jatkoanalyysijä datan laadun, vertailukelpoisuuden ja konsistenssin takaamiseksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tärkeitä preprosessointivaiheita ovat radiometrinen kalibrointi, geometrinen korjaus, ilmakehäkorjaus (atmospheric correction) ja aallonpituuskalibrointi (wavelength calibration). Edelleen Hongin ja muiden mukaan radiometrisellä kalibroinnilla raa'at sensoriarvot muutetaan reflektanssi- tai radianssarvoiksi korjaamalla sensorin vasteen variabiliteettia ja detektorin herkkyyttä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan radiometrinen kalibrointi tehdään usein kuvaamalla hyvin karakterisoituja referenssikohteita, kuten valkoisia ja mustia kalibrointipaneeleita. Edelleen Hongin ja muiden mukaan geometrinen korjaus alignoi spektrisen datan spatiaalisesti korjaten alustan liikkeestä, instrumentin optiikasta ja kuvantamisgeometriasta johtuvia

vääristymiä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan täsmällinen geometrinen alignointi on kriittistä eri ajankohtina ja eri alustoilla kaapattujen kuvien tarkalle vertailulle ja analyysille. Edelleen Hongin ja muiden mukaan erityisesti satelliitti- tai ilma-alusalustoja käytettäessä vesihöyry, aerosolit ja ilmakehän kaasut absorboivat tai aiheuttavat sirontaa ja täten vääristävät mitattuja spektrisignatuureja. Edelleen Hongin ja muiden mukaan erilaisia ilmakehäkorjausalgoritmeja (radiative transfer model-perusteisia tai empiirisesti johdettuja) käytetään poistamaan näitä vaikutuksia tarkkojen standardisoitujen pinnan reflektanssiarvojen saamiseksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan aallonpituuskalibroinnilla taataan kuvantavan spektrometrin tallentamien spektrikaistojen tarkka vastaavuus tunnettujen aallonpituusstandardien kanssa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan aallonpituuskalibrointiin käytetään tyypillisesti referenssilähteitä tai hyvin määriteltyjä absorptio-ominaisuuksia validoimaan ja tarvittaessa säätämään spektrialignointia.

Hongin ja muiden (2026) mukaan edelleen ympäristön olosuhteet ja operointikäytännöt sisältäen valaistusolosuhteet (aurion kulma, ilmekehän selkeys ja varjostuminen), säänvaihtelut ja observointikulmat vaikuttavat merkittävästi hyperspektrisen tiedonkeruun konsistenssiin, spektriseen integriteettiin ja luotettavuuteen. Edelleen Hongin ja muiden mukaan katselugeometrian (viewing geometry) tekijät kuten sensorin kallistus, korkeus ja kohteen suunta vaikuttavat merkittävästi spektrimittauksiin erityisesti erilaisten pintojen kaksisuuntaisen heijastumisen karakteristiikasta johtuen.

Hongin ja muiden (2026) mukaan hyperspektrisen data-analyysin työnkulku alkaa kalibroidun hyperspektridatan (radianssi- tai reflektanssi) hankkimisen jälkeen ja aluksi siinä tyypillisesti harkitaan alustavia kuvankäsittelyvaiheita kuten kuvan restaurointi, kuvan kohentaminen (enhancement) tai dimensioiden redusointi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näiden jälkeen suoritetaan korkeamman tason analyttisiä tehtäviä kuten luokittelu ja spektrinen erottelu merkityksellisen ja toiminnan pohjaksi soveltuvan informaation johtamiseksi hyperspektrikuvista. Edelleen Hongin ja muiden mukaan hyperspektrisessä datassa on laatuvarioituja johtuen ympäristön vaikutuksista sekä

instrumentista johtuvista tekijöistä (sensorin kohina, kalibroinnin ryömintä ja optiset aberratiot) ja nämä tuottavat degradaatioita (kompleksinen kohina, raidoittuminen, puuttuminen, vahingoittuminen ja okkluusio). Edelleen Hongin ja muiden mukaan erilaisia restaurointitehtäviä ovat esimerkiksi denoising, destriping, inpainting ja deblurring. Edelleen Hongin ja muiden mukaan kuvan kohentamisessa pyritään hyperspektrisen datan spatiaalisiin (pan-sharpening ja spatiaalinen suodatus) ja spektrisen resoluution parannuksiin (spektrinen super-resoluutio). Edelleen Hongin ja muiden mukaan hyperspektrisen kohentamisen tehtävät tyypillisesti jaotellaan datafuusioon ja spektriseen rekonstruktioon. Edelleen Hongin ja muiden mukaan datafuusiomenetelmissä yhdistetään matalan resoluution hyperspektrikuviin spatiaalisen resoluution parantamiseksi muita täydentäviä korkean resoluution datalähteitä kuten esimerkiksi korkean resoluution pankromaattisia kuvia tai multispektrikuvia. Edelleen Hongin ja muiden mukaan rekonstruktioimenetelmissä puolestaan kuten spektrisessä super-resoluutiossa pyritään palauttamaan korkealaatuisia spektrisignatuureja alhaisemman laadun (degraded) datalähteistä kuten multispektri- tai RGB-kuvista, ts. spektrinen upsampling.

Hongin ja muiden (2026) mukaan hyperspektridatan luontainen korkeaulotteisuus aiheuttaa haasteita laskentakuormana, spektrisenä redundanssina (vahva kaistojen välinen korrelaatio) ja korkeampana riskinä ylisovittamiselle myöhäisemmissä analyysitehtävissä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan dimensioiden redusoinnissa lähestymistavat voidaan luokitella kaistanvalintaan ja transform-pohjaisiin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan kaistanvalinnassa valitaan kaikista spektrikaistoista rajatumpi joukko mahdollisimman informatiivisia ja representatiivisia spektrikaistoja erilaisten kriteerien pohjalta (mutual information, maximum entropy ja minimum reconstructed error). Edelleen Hongin ja muiden mukaan transform-pohjaisissa lähestymistavoissa dimensioita redusoidaan projisoimalla alkuperäinen data alhaisemman dimension aliavaruuteen säilyttämällä informatiivisimmat spektriset tai spatiaalis-spektriset rakenteet. Edelleen Hongin ja muiden mukaan PCA (principal component analysis) ja MNF (minimum noise fraction) ovat kaksi edustavinta näistä menetelmistä. Edelleen

Hongin ja muiden mukaan PCA kaappaa eniten varianssia sisältäviä komponentteja ja pakkaa täten informaatiota samalla säilyttäen avainasemassa olevia spektraalisia piirteitä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan MNF puolestaan pyrkii maksimoimaan kunkin tuotetun komponentin SNR:n eli se priorisoi informaatorikkaita piirteitä ja vaimentaa kohinavoittoisia piirteitä.

Hongin ja muiden (2026) mukaan luokittelu liittää jokaiseen pikseliin ennaltamääritetyn kategorian tai luokan. Edelleen Hongin ja muiden mukaan luokittelumenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen lähestymistapaan riippuen tarvitseeko menetelmä koulutuksensa aikana asiantuntijoiden annotoimia datan oikeita arvoja (ground-truth label). Edelleen Hongin ja muiden mukaan valvottoman (unsupervised) lähestymistapa toimii ilman tällaista dataa ja valvottu (supervised) lähestymistapa puolestaan edellyttää tällaista dataa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan valvomatonta luokittelua kutsutaan usein myös segmentoinniksi ja se ryhmittelee pikselit spektrisesti homogeenisiin alueisiin käyttäen klusterointialgoritmeja kuten esimerkiksi K-means. Edelleen Hongin ja muiden mukaan valvotussa luokittelussa osaa saatavilla olevasta datasta käytetään yhdessä valmiiksi annotoitujen data-luokkien kanssa kouluttamaan tilastollinen tai koneoppimiseen perustuva malli, joka oppii diskriminatiivisia patterneja spektraalisessa tai spatiaalis-spektraalisessa domainissa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tätä valvotulla menetelmällä koulutettua mallia voidaan kouluttamisen jälkeen käyttää luokitteluun loppuosaa saatavilla olevasta datasta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan LDA (linear discriminant analysis), KNN (K-Nearest neighbors), SVM (support vector machine) ja RF (random forest) ovat laajasti käytettyjä valvottuja malleja.

Hongin ja muiden (2026) mukaan HSI-järjestelmissä on usein tehty kompromissi spatiaalisen resoluution kustannuksella korkean spektraalisen resoluution saavuttamiseksi ja tämä johtaa usein pikselitasolla esiintyvään spektriseen sekoittumiseen, jolloin kukin pikseli tallentaa useammasta materiaalista johtuneiden signaalien yhdistelmäsignaalin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tätä esiintyy sekä makroskooppisella tasolla (vierekkäiset maalajit) että mikroskooppisella tasolla, jossa

alipikselin tasoiset materiaalien interaktiot kuten molekylaariset tai jopa atomitason vaikutukset johtavat monimutkaisiin yhdistelmiin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan spektrinen erottelu tarkoittaa havaitun pikselin spektrisignatuurin erottelua siinä esiintyviin endmembereihin eli puhtaita materiaaleja edustaviin spektrisignatuureihin ja niiden suhteellisiin osuuksiin esitettynä tyypillisesti osuuskarttina (abundance map). Edelleen Hongin ja muiden mukaan LMM (linear mixture model) on laajasti käytetty malli perustuen oletukseen tasaisesta pinnasta ja kertsironnasta (single scattering) ja tässä mallissa havaitun pikselin spektri on lineaarinen painotettu summa pikselissä esiintyvien puhtaiden materiaalien spektreistä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tämän mallin mukaiseen spektriseen erotteluun on kaksi pääparadigmaa eli sekventiaalinen ensin endmemberit erottava ja vasta sitten osuudet estimoiva tapa tai yhdistetty erottelutapa, jolloin molemmat komponentit estimoidaan samanaikaisesti. Edelleen Hongin ja muiden mukaan sekventiaalisessa menetelmässä endmemberien spektrit haetaan joko kuratoiduista spektrikirjastoista tai erotellaan suoraan HSI-datasta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan endmemberien erottelu HSI-datasta olettaa joidenkin pikselien edustavan puhtaita pikseleitä/endmembereitä eli pääosin yhtä materiaalia ja esimerkiksi PPI- (pixel purity index), N-FINDR-, ja VCA-algoritmeja (vertex component analysis) käytetään tyypillisesti erottamaan tällä tavoin spektraalisesti eniten distinktejä pikseleitä ja ne tulkitaan endmembereiksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tällä tavoin HSI-datasta erotettuja endmembereitä voidaan edelleen jatkoidentifioida vertaamalla niitä samankaltaisuusmitoilla (similarity metrics) kuten euklidisella etäisyydellä tai spektrisellä kulmaetäisyydellä (spectral angle distance) spektrikirjastojen sisältämiin endmembereihin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan endmemberien määrittelyn jälkeen niiden osuuksia voidaan estimoida käyttämällä pienimmän neliösumman optimointitapaa, jossa minimoidaan virhe havaitun pikselin spektrin ja endmemberien spektreistä koostuvan lineaarisen approksimoinnin välillä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan fysikaalisen plausibiliteetin vuoksi menetelmää käytetään kahdella rajoituksella eli ensinnä jokaisen endmemberin osuus tulee olla suurempi kuin nolla ja toiseksi endmemberien osuuksien tulee summautua yhteensä arvoon yksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan yhdistetyssä spektrierottelutavassa sekä endmemberit että niiden

osuudet mallinnetaan kahtena matriisina ja niitä käsitellään tuntemattomina suoraan HSI-dataan perustuen estimoitavina muuttujina. Edelleen Hongin ja muiden mukaan fyysikaalisten rajoitteiden kanssa ja hakemalla rekonstruktiovirheen minimointia näiden matriisien ratkaisu redusoituu muistuttamaan NMF-ongelmaa (nonnegative matrix factorization). Edelleen Hongin ja muiden mukaan ratkaisu etenee tyypillisesti vuorottelevalla optimoinnilla, jossa endmember-matriisia ja osuusmatriisia päivitetään iteratiivisesti. Edelleen Hongin ja muiden mukaan endmember matriisin initialisointia ohjataan usein käyttämällä endmemberin erottelumenetelmää kuten VCA, jotta konvergenssille saadaan fyysikaalisesti vakuuttavia ja spektrisesti distinktejä aloituspisteitä.

2.2.3 Nykytilanne ja sovellukset

Hong ja muut (2026) esittelevät erilaisia HSI-alustoja kuten avaruuteen sijoitetut (satelliitti), ilmakehässä lentävät (lentokoneet, dronit), maanpinnalle sijoitetut sekä kannettavat tai laboratoriolaitteet. Seuraava taulukko 5 esittää yhteenvedon erilaisista alustoista ja niiden tärkeimpiä ominaisuuksia esimerkkijärjestelmien arvoilla.

Taulukko 5. Hyperspektrikameroiden ominaisuuksia käyttöympäristön mukaan (Hong ja muut, 2026).

Ominaisuus	Avaruuteen sijoitettu	Ilmakehässä lentävä	Maanpinnalle sijoitettu	Kannettava tai laboratoriolaitte
Spektrialue ¹	420 – 2 450	380 – 2 450	350 – 2 500	350 – 2 500
Spektrikaistoja	242	426	2 151	2 151
Spektri-resoluutio ¹	5 - 10	1 - 5	1 - 3	1
Spatiaalinen resoluutio	30 m	1 - 5 m	cm to m	< 1 mm

¹nm

Hong ja muut (2026) esittelevät erilaisia HSI datasettejä ja näiden joukosta valittiin seuraavaan taulukkoon 6 datamäärältään suurimpia kuvaamaan tällaisten hyperspektrikuutioiden merkittävimpiä ominaisuuksia.

Taulukko 6. Esimerkkejä hyperkuutioista (Hong ja muut, 2026).

Hyperkuutio	2D-kuvakoko	Spektrikaistoja	Pistemäärä	Datamäärä (GB)
Beverage HSI	11 444 × 1 800	186	$3,73 \cdot 10^9$	7,46
IBT	1 004 × 741	826	$0,61 \cdot 10^9$	1,23
Hyper-Skin	1 024 × 1 024	448	$0,47 \cdot 10^9$	0,94
HOSD	2 128 × 689	224	$0,33 \cdot 10^9$	0,66
IPK	1 624 × 1 234	152	$0,30 \cdot 10^9$	0,61
AVIRIS (Leeser)	614 × 512	224	$0,07 \cdot 10^9$	0,14

Hong ja muut (2026) mainitsevat esimerkkeinä hyperspektrikuvantamisen sovellusalueista ympäristön havainnoinnin, maa- ja metsätalouden, biolääketieteen, teollisen laadunvalvonnan, kulttuuriperinnön aineistojen tutkimisen, rikosteknisen tutkimuksen, autonomisen navigoinnin, kierrätyksen järjestelmät, turvallisuusalan, puolustusteknologian ja valvontateknologian.

2.2.4 Haasteet ja avoimet kysymykset

Hongin ja muiden (2026) mukaan merkittävästä kehityksestä huolimatta HSI:tä rajoittavat useat pysyvät haasteet, jotka johtuvat perustavanlaatuisista vastakkainasetteluista (trade-off) hardwaren suorituskyvyssä, herkkydestä ympäristölle ja variabiliteetista tiedonkeruussa sekä korkeaulotteisen data-analyysin monimutkaisuudesta. Edelleen Hong ja muut ovat tunnistaneet hardwaren suorituskyvyn haasteina spektri-spatiaalisen vastakkainasettelun (spektriresoluution kasvattaminen kaventaa spektrikaistoja ja vähentää kaistakohtaista energiamäärää, jolloin SNR:n pitäminen ennallaan tarkoittaa heikentyneitä spatiaalista resoluutiota ja pidempiä integrointiaikoja), SNR:n ja tiedonkeruunopeuden vastakkainasettelun (korkean spektritarkkuuden saavuttaminen reaaliaikaisesti on haastavaa erityisesti

vähäisesti valaistuissa tai dynaamisissa ympäristöissä), datan volyymin ja tiedonsiirtonopeuden pullonkaulat (HSI tuottaa useita kertaluokkia suurempia datamääriä kuin perinteiset kuvantamismenetelmät ja se asettaa merkittäviä vaatimuksia muistille, tiedonsiirkotaistalle ja tallennukselle erityisesti sulautetuissa tai dronipohjaississa reaaliaikaisesti dataa siirtävissä tai prosessoivissa järjestelmissä), sensorin miniaturisoinnin ja suorituskyvyn vastakkainasettelun (kenttäolosuhteisiin, drooneihin ja puettaviin tarkoituksiin tarvittavissa kompakteissa ja kevyissä HSI-järjestelmissä on usein heikompi optinen laatu, detektorin herkkyys tai jäähdytyskapabiliteetti ja tarkkuuden parantaminen on edelleen merkittävä tekninen haaste) sekä hardwaren kustannuksen ja skaalattavuuden (korkealaatuisten hyperspektrimeroiden tarvitsema tarkka optiikka, dispersiiviset elementit ja herkäät sensorit ovat edelleen kalliita ja vaikeasti skaalattavia, mikä rajoittaa niiden saatavuutta kustannusherkillä alueilla kuten maataloudessa ja vierihoidodiagnostiikassa).

Hongin ja muiden (2026) mukaan todellisissa olosuhteissa HSI on erittäin herkkä ulkoisille fysikaalisille ja ympäristöstä johtuville olosuhteille aiheuttaen haasteita toistettavuudelle, vertailtavuudelle ja sovellusalueet ylittävälle yleistämiselle. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näistä epäjohtonmukaisuuksista tulee kriittisiä tekijöitä siirryttäessä laboratorio-olosuhteista (josta ne puuttuvat) kenttäolosuhteisiin tai avaruus-/ilma-alussovelluksiin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näitä tekijöitä ovat valaistuksen variabiliteetti, ilmakehän häiriöt (erityisesti SWIR- ja TIR-kaistoilla), pinnan anisotrooppisuus, sensorispesifiset karakteristiikat sekä korrektion haasteet (korrektioita on vaikea soveltaa robustilla tavalla heterogeenisille näkymille rajoittaen mallien siirrettävyyttä ja standardointia).

Hongin ja muiden (2026) mukaan HSI-datan korkeaulotteisuus ja monimutkainen rakenne aiheuttavat merkittäviä haasteita algoritmien suunnittelulle, laskennan tehokkuudelle ja tulkittavuudelle. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näitä haasteita pahentavat vielä sensorien datan karakteristiikan variabiliteetti ja rajoitettu saatavuus korkealaatuisesti annotoitujen näytteiden osalta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan

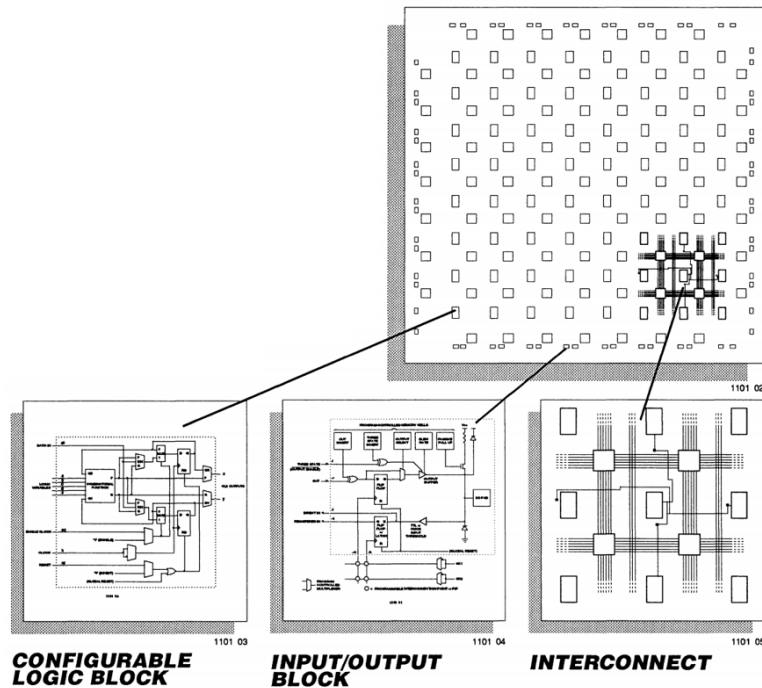
hyperspektrikuutioiden laajennus aikasarjoihin nostaa ennestään ulottuvuuksia ja voimistaa "ulottuvuuksien kirousta" aiheuttaen merkittäviä haasteita tehokkaalle tallennukselle, skaalattavalle prosessoinnille ja luotettavalle HSI-datan analyysille. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI:n kapeakaistainen tiedonkeruu tuo mukanaan vahvaa kaistojen välistä korrelaatiota aiheuttaen merkittävää redundanssia ja yhdistettynä tiettyjen spektrikaistojen alhaiseen SNR:ään se vaikeuttaa tehokkaan ja diskriminatiivisen informaation erottelua ja louhimista HSI-datasta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan suuri vaihtelevuus HSI-järjestelmien välillä (spektrikaistat, aallonpituusalueet, sensorien karakteristiikat) vaikeuttaa koulutettujen mallien joustavaa uudelleenkäyttöä ja niiden suorituskykytulosten toistettavuutta. Edelleen Hongin ja muiden mukaan tämä pirstaloituminen rajoittaa skaalattavuutta sensorien välillä ja asettaa mittavan esteen robustien ja siirrettävien analyysiprosessiputkien kehittämiseksi. Edelleen Hongin ja muiden mukaan korkealaatuinen hyperspektrinen data-analyysi nojaa vahvasti työlääseen, aikaavievään ja erikoisosaamista vaativaan tarkkaan datan annotointiin. Edelleen Hongin ja muiden mukaan näistä syistä johtuen annotoidut datasetit ovat harvassa ja ne ovat mittaluokaltaan rajoitettuja, mikä rajoittaa robustien mallien kehittämistä ja hankaloittaa kehitystä kohti suuren mittaluokan, korkean suorituskyvyn ja nopeaa HSI prosessointia ja tulkintaa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan HSI datan korkeaulotteisuus ja monimutkainen spektri-spatiaalinen kytkentä vaatii erityisiä malliarkkitehtuureja suurella laskennallisella jalanjäljellä. Edelleen Hongin ja muiden mukaan vaikkakin syväoppimisen (deep learning) menetelmät ovat olleet lupaavia, niiden mustan laatikon omainen luonne ja fyysikaalisen tulkinnan puute aiheuttavat huolia korkeiden riskien alueilla kuten maataloudessa, ympäristöalalla ja terveydenhoidossa. Edelleen Hongin ja muiden mukaan hyperspektriset mallien yleistäminen laboratorio-olosuhteista todelliseen maailmaan usein epäonnistuu johtuen tiedonkeruuseen liittyvistä tekijöistä (vaihteleva valaistus, ilmakehän vaikutukset tai materiaalien heterogeenisyys). Edelleen Hongin ja muiden mukaan tämä vaikeuttaa mallien luotettavaa käyttöönottoa erilaisten havainnointialustojen ja sovellusympäristöjen välillä.

Hong ja muut (2026) näkevät tulevaisuuden mahdollisuutena useiden eri HSI järjestelmäalustojen (satelliitti, ilma-alus ja kädessä pidettävä) ja aallonpituusalueiden (VNIR, SWIR ja TIR) yhdistetyn käytön hyödyntäen niiden toisiaan täydentäviä spatiaalisia, spektraalisia ja aikaan liittyviä karakteristiikoita useassa skaalassa ja usealla resoluutiolla toimivan havainnoinin saavuttamiseksi. Edelleen Hong ja muut näkevät tulevaisuuden mahdollisuutena hyperspektrisen datan ja sitä täydentävien havainnointimenetelmien kuten syvyysanturien (LiDAR eli light detection and ranging sekä strukturoitu valo), tutkajärjestelmien (SAR, synthetic aperture radar), lämpökameroiden, tapahtumakameroiden ja jopa semanttisen tai kontekstuaalisen datan (teksti, metadata ja sosiaalinen media) yhdistämisen yhteiseen mallinnuskehikseen (joint modeling framework). Edelleen Hongin ja muiden mukaan tällainen multimodaalinen fuusio sallii HSI:n toimivan keskitettynä kerroksena rikkaammassa useamman lähteen havainnointijärjestelmässä tuottaen parannettua syvyyttä, strukturaalista kontekstia ja materiaalitarkkuutta, jota ei ole saatavilla ainoastaan spektri-informaation perusteella.

2.3 FPGA-tekniikan tutkimusalue

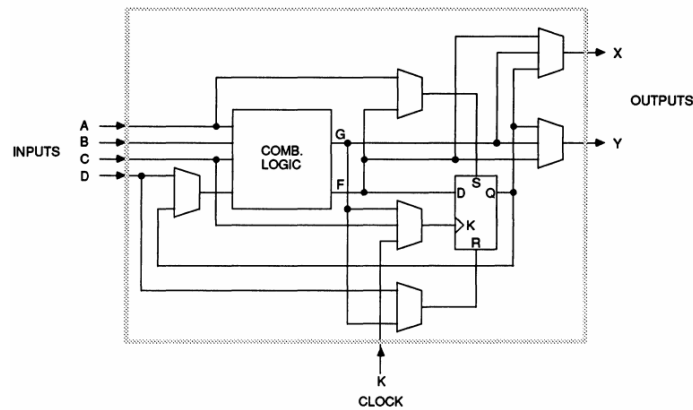
2.3.1 Ensimmäinen FPGA-piiri ja moderni FPGA-piiri

Xilinx (1988, s. 11) julkaisi vuonna 1985 ensimmäisen FPGA-piiri (field-programmable gate array) tuotteensa XC2064. Xilinx (1988, s. 10) esitti tällöin FPGA-piirin vaihtoehtona tehtaalla ohjelmoiduille custom tai semicustom ASIC-piireille (application specific integrated circuit). Edelleen Xilinxin mukaan FPGA:t olivat ensimmäisiä korkean tiheyden ASIC:eja, jotka ovat käyttäjän konfiguroitavissa. Seuraava kuva 3 esittää ensimmäisen FPGA-piirin rakenteen.



Kuva 3. Ensimmäisen FPGA-piirin arkkitehtuuri (Xilinx, 1988, s. 11).

Xilinxin (1988, s. 11) mukaan piirissä on matriisi identtisiä konfiguroitavia logiikkablokkeja (configurable logic block, CLB) ja sitä ympäröivä rengas I/O-rajapintablokkeja. Edelleen Xilinxin mukaan interconnect-resurssit varaavat logiikkablokkien rivien ja sarakkeiden väliset kanavat sekä logiikkablokkien ja I/O-rajapintablokkien väliset kanavat. Edelleen Xilinxin mukaan piiri on mikroprosessorin kaltaisesti ohjelmaohjattu (program-driven) logiikkapiiri. Edelleen Xilinxin mukaan piirin logiikkablokkien, I/O-blokkien ja niiden välisen interconnectin funktioita kontrolloidaan piirillä sijaitsevalla konfiguraatio-ohjelmalla. Edelleen Xilinxin mukaan logiikkablokki sisältää ohjelmoitavan kombinatorisen logiikan sekä muistirekistereitä (storage registers). Edelleen Xilinxin mukaan kombinatorisen logiikan osuus voi toteuttaa logiikkablokin inputeista minkä tahansa Boolean funktion ja muistirekisterit voidaan ladata joko kombinatorisesta logiikasta tai suoraan logiikkablokin inputeista. Seuraava kuva 4 esittää konfiguroitavan logiikkablokin sisäisen rakenteen.



Kuva 4. Ensimmäisen FPGA-piirin konfiguroitava logiikkablokki (Xilinx, 1988, s. 85).

Xilinxin (1988, s. 11) mukaan I/O-blokki voidaan täysin riippumattomasti ohjelmoida inputiksi, outputiksi tai kaksisuuntaiseksi pinniksi. Edelleen Xilinxin mukaan interconnect mahdollistaa minkä tahansa kahden pisteen yhdistämisen piirillä käyttäen logiikkablokkien välissä kahdessa metallikerroksessa kulkevia pysty- ja vaakasuoria linjoja. Edelleen Xilinxin mukaan I/O-blokkien ja logiikkablokkien inputit ja outputit yhdistetään ohjelmoitavilla kytkimillä lähellä kulkeviin interconnect-linjoihin. Edelleen Xilinxin mukaan crosspoint-kytkimet ja interchanget pysty- ja vaakasuorien linjojen risteämispisteissä mahdollistavat signaalien kytkennän linjalta toiselle. Edelleen Xilinxin mukaan interconnectissa on interchangien ohittamista varten myös koko piirin pituudelta ja leveydeltä kulkevia pitkiä linjoja antaen mahdollisuuden kriittisten signaalien välittämiseksi minimaalisella viiveellä ja vinoutumisella.

Tutkielmassa tehdyn tuotekartoituksen mukaan AMD:n (Xilinx) Versal tuoteperheeseen kuuluva Versal Premium VP1902 on yksi nykypäivän uusimmista ja logiikkablokeissa mitattuna suurimmista FPGA-piireistä. Ensimmäiseen yhdellä puolijohdesirulla toteutettuun FPGA-piiriin (XC2064) verrattuna VP1902 FPGA-piiri rakentuu Gaitonden (2023) mukaan chiplet-teknologialla neljästä 2×2 matriisiin muotoon järjestetystä erillisestä puolijohdesirusta, joiden väliset korkean bandwidthin ja matalan latenssin signaalit kuljetetaan silicon interposer kerroksen kautta.

Tutkielmassa tehdyn tarkastelun mukaan ensimmäisestä FPGA-piiristä (XC2064) löytyvien kolmen eri tyyppin komponenttien eli logiikkablokkien, I/O-blokkien ja interconnectin lisäksi AMD:n (Xilinx) Versal tuoteperheen FPGA-piireissä on näiden lisäksi kirjava joukko eri tyyppisiä komponentteja: kiinteitä osittain analogisia blokkeja, kiinteitä digitaalisia blokkeja sekä kiinteitä erikoistuneita interconnect-resursseja. Kiinteitä osittain analogisia blokkeja ovat esimerkiksi PLL (phase-locked loop), SERDES (serializer/deserializer), RF-ADC (radio frequency analog to digital converter) ja RF-DAC (radio frequency digital to analog converter). Kiinteitä digitaalisia blokkeja ovat esimerkiksi erilaiset RAM-blokit, erilaiset CPU:t, DSP-blokit, AI-ML-blokit, DDR-ohjaimet, PCIe-ohjaimet, serial transceiverit 100G, Ethernet 600G ohjaimet, Interlaken 600G ohjaimet, high-speed crypto enginet 400G, GPU:t, video codec blokit, image signal prosessoriblokit. Kiinteä erikoistunut interconnect resurssi on esimerkiksi network-on-chip (NoC).

Seuraava taulukko 7 esittää vertailun muutamista ominaisuuksista ensimmäisen FPGA-piirin XC2064 ja modernin FPGA-piirin VP1902 välillä.

Taulukko 7. XC2064 ja VP1902 piirien muutamien ominaisuuksien vertailu.

Ominaisuus	XC2064 ¹	Versal VP1902
I/O pinnejä	58	2 064
LUT	64	8 460 288
FF	64	16 920 576
Kellotaajuus	70 MHz	600 – 1 150 MHz
Puolijohdesiruja	1	4 (2 × 2 matriisi)
Konfiguraation koko	12 038 bittiä	573 MB
Eri tyyppisiä komponentteja	3 (CLB, I/O, interconnect)	yli 20 erilaista

¹Xilinx (1988) mukaan.

2.3.2 Yleinen teoreettinen viitekehys

Tutkielman aikana kartoitettujen ja saatavilla olleiden lähteiden joukosta oli vaikeaa löytää sopivia lähteitä, jossa FPGA-tekniikka ja sen tutkimusalue olisi asetettu

tydyttävään teoreettiseen viitekehykseen eli FPGA-tekniikkaa olisi käsitelty tarpeeksi yleisellä tasolla koko tutkimusaluetta ja sen koko elinkaarta ajatellen. Tutkielmassa päädyttiin lopulta taustateorian ja oletusten puolesta käsittelemään FPGA-piiriä kuin tietokonetta (computer). Tässä asetelmassa FPGA-tekniikkaa tarkastellaan kuin tietokoneiden tekniikkaa ja saadaan tarkastelun pohjaksi riittävän yleinen ja kattava viitekehys koko tutkimusalueelle sen koko elinkaaren ajalta.

Tässä aliluvussa esitellään käsitteet tietojenkäsittelytiede, tietokone, hardware, rinnakkaisuus ja liukuhihnoittaminen, Estrinin rekonfiguroitavan tietokoneen malli, Flynnin ja Lukin yksinkertaistettu malli CGRA:n (coarse-grain reconfigurable array) ja FPGA:n sijoittumisesta tekniikoiden vertailussa, Flynnin rinnakkaisten arkkitehtuurien luokittelu, Bolotskin ja muiden FPGA- ja SIMD-arkkitehtuurit (single instruction stream, multiple data stream) kattava yleinen laskennallisen matriisin malli, massiivisesti rinnakkain laskevat neuroverkot ja klassisten tietokoneiden kapabiliteetit ylittävän kvanttietokoneen FPGA:ta muistuttava rakenne.

Comerin ja muiden (1989) raportti eli ACM:n työryhmän raportti pohti tietojenkäsittelytieteen (computer science) olemusta ja antoi sille seuraavan lyhyen määritelmän: ”Laskennan tieteenala on informaatiota kuvaavien ja muuttavien algoritmisten prosessien systemaattista tutkimusta eli niihin liittyvä tai niiden teoria, analyysi, suunnittelu, tehokkuus, implementointi ja soveltaminen. Perustavanlaatuinen kysymys kaiken laskennan taustalla on, että mitä voidaan (tehokkaasti) automatisoida”. Määritelmän viimeiseen lauseeseen liittyen ja sen merkittävyyttä korostaen Knuthin (1972) mukaan George Forsythe totesi jo aiemmin vuonna 1968 kysymyksen ”Mitä voidaan automatisoida?” olevan nykypäivän sivilisaatiossa yksi kaikkein inspiroivimmista filosofisista ja käytännön kysymyksistä. Denningin ja Tedren (2019, s. 90) mukaan kaikki laskennan alueet osallistuvat automatisointiin, mutta tekoäly (artificial intelligence, AI) on noussut laskennassa keskiöön ihmisten kognitiivisten tehtävien ja muun ihmistyön automatisoinnissa.

Adamsin ja muiden (1954) ACM:lle tekemässä raportissa eli ensimmäisessä ohjelmoinnin terminologian sanastossa määritetään tietokoneen (computer) olevan mikä tahansa laite, joka kykenee vastaanottamaan informaatiota, kykenee soveltamaan määrättyjä (prescribed) prosesseja informaatioon ja kykenee toimittamaan näiden prosessien tulokset. Edelleen Adamsin ja muiden (1954) sanastossa määritetään hardware sellaisiksi mekaanisiksi, magneettisiksi, sähköisiksi ja elektronisiksi laitteiksi, joista tietokone on rakennettu (constructed). ACM:n (2012) uudemmassa CCS-luokittelussa (computing classification system) hardware-luokassa perinteisten tekniikoiden lisäksi ”uudet teknologiat”-osiosta (emerging technologies) löytyy myös muun muassa biologisiin, optisiin ja kvantti-ilmiöihin perustuvia tekniikoita. Knuthin (1972) mukaan Forsythen pohtiessa tietojenkäsittelytieteen kehittymisen mahdollista loppumista Forsythe totesi tietojenkäsittelytieteen olevan tietokoneiden (computer) tutkimusta ja kehitys ei siten voisi loppua kuin vasta vuosien kuluttua hardwaren kehittymisen loputtua (level off) ja Forsythen mukaan tällaista hardwaren kehittymisen loppumista ei ollut näköpiirissä.

Tieteenalan määritelmän lisäksi Comerin ja muiden (1989) raportti eli ACM:n työryhmä määritteli laskennan tieteenalan ala-alueita ja totesi jättäneensä pois joitakin tieteellisessä kirjallisuudessa esiintyviä aiheryhmiä heidän määrittelemiensä ala-alueiden joukosta, koska kyseiset aiheryhmät ovat perushuolia (basic concerns) läpi koko tieteenalan. Edelleen Comerin ja muiden mukaan tällaisena aiheryhmänä esimerkiksi rinnakkaisuus nousee esiin jokaisella tietojenkäsittelytieteen ala-alueella (rinnakkaiset algoritmit, rinnakkaiset ohjelmointikielet, rinnakkaiset arkkitehtuurit jne) ja vastaava johtopäätös koskee myös turvallisuutta (security), luotettavuutta ja suorituskyvyn arviointia (performance evaluation).

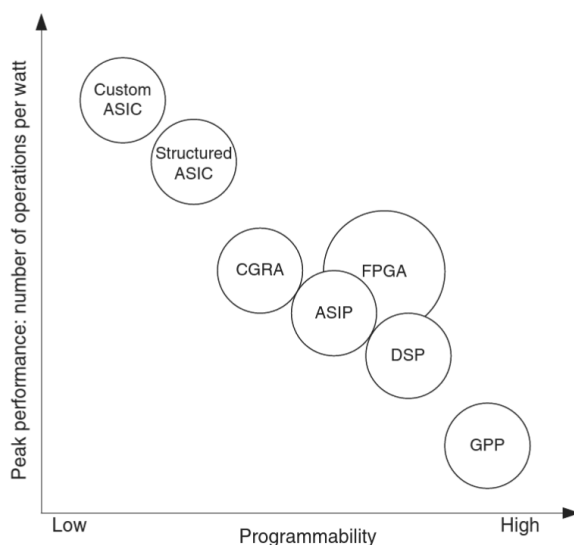
Ralstonin ja muiden (2003, s. 1349) eli Wiley:n julkaiseman tietojenkäsittelytieteen ensyklopedian mukaan rinnakkainen käsittely (parallel processing) tarkoittaa aidon rinnakkaisuuden (concurrency) käyttöä tietokonejärjestelmän operoinnissa throughputin kasvattamiseksi, vikasietoisuuden kasvattamiseksi tai erityisten ongelmien

ratkaisemiseen tarvittavan ajan lyhentämiseksi. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan rinnakkainen käsittely on ainoa reitti kaikkein korkeimpaan tietokoneen suorituskykyyn. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan fysiikan lait ja valmistuskyky (manufacturing capabilities) rajoittavat kytkentäaikoja ja integrointitiheyksiä nykyisissä puolijohteisiin perustuvissa laitteissa ja asettavat siten katon minkä tahansa yksittäisen laitteen operointinopeudelle. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan kaikki modernit tietokoneet perustuvat jossain määrin rinnakkaisuuteen ja nopeimmissa tietokoneissa rinnakkaisuutta on nähtävissä monella tasolla. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan aidon rinnakkaisuuden (concurrency) kasvattamiseen on kaksi menetelmää: liukuhihnoittaminen (pipelining) ja rinnakkaisuus (parallelism). Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan liukuhihnoittamisessa suoritettava operaatio jaetaan eri vaiheisiin ja eri tehtävät voivat olla eri suoritusvaiheessa. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan liukuhihnoittamista on esimerkiksi autojen valmistus autotehtaan liukuhihnalla (liukuhihnan läpi kulkee lukuisia autoja eri valmistusvaiheissa). Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan rinnakkaisuus tarkoittaa useamman resurssin käyttöä aidon rinnakkaisuuden kasvattamiseksi ja esimerkkinä he mainitsevat useamman leikkuupuimurin käytön viljapellon sadonkorjuussa.

Estrinin (2002) mukaan John Pasta oli huolissaan monien erittäin tärkeiden (vital) laskennallisten ongelmien ratkaisemisen ylittävän senaikaisten tietokoneiden kapabiliteetit ja tietokoneiden valmistajien kehityksen keskittyvän kaupallisiin markkinoihin. Edelleen Estrinin mukaan vastauksena tähän Estrin ehdotti vuonna 1960 itse ensimmäisenä tietokoneen rakenteeksi ”kiinteän plus muuttuvan rakenteen tietokonetta” (fixed plus variable structure computer), jossa kiinteän yleiskäyttöisen tietokoneen yhteydessä on muuttuvarakenteinen varasto rekonfiguroitavia rakennusblokkeja (reconfigurable building blocks). Edelleen Estrinin mukaan hänen ajatuksenaan oli mahdollistaa senaikaisten järjestelmien kapabiliteettien ylittäviä laskentoja tarjoamalla korkean nopeuden alirakenteita ja säännöt niiden yhdistämiselle siten että koko järjestelmä voidaan väliaikaisesti muuttaa tehtävään suuntautuneeksi erikoistarkoitukseen tarkoitetuksi tietokoneeksi (problem oriented special purpose

computer). Rekonfiguroitavuuden lisäksi alkuperäisessä julkaisussaan Estrin (1960) korosti senaikaisten uusien, kehitysvaiheessa olevien tai tutkimuksen alla olevien tehokkaimpien digitaalisten tietokoneiden olevan eri tavoin operaatioiden rinnakkaisuutta tarjoavia universaaleja ohjelmoitavia (stored program) koneita. Edelleen Estrinin (1960) mukaan näissä koneissa rinnakkaisuutta on tuotu käyttöön esimerkiksi tarjoamalla useampi kuin yksi aritmeettinen laskentayksikkö tai kontrolloimalla useamman kuin yhden koneen rinnakkaista operointia.

Estrinin jo varhain esittämää rekonfiguroitavuutta voidaan tarkastella erilaisten teknologisten ratkaisujen kehittämisen myötä seuraavaan Flynnin ja Lukin (2011, s. 6) esittämän yksinkertaistetun teknologioiden vertailun mallin avulla. Seuraava kuva 5 esittää Flynnin ja Lukin yksinkertaistetun mallin, jossa teknologian ohjelmoitavuus kasvaa vakaa-akselilla oikealle päin ja teknologian tehokkuus mitattuna operaatioina wattia kohden kasvaa pysty-akselilla ylöspäin.



Kuva 5. Yksinkertaistettu teknologioiden vertailu: ohjelmoitavuus vs. tehokkuus (Flynn & Luk, 2011, s. 6).

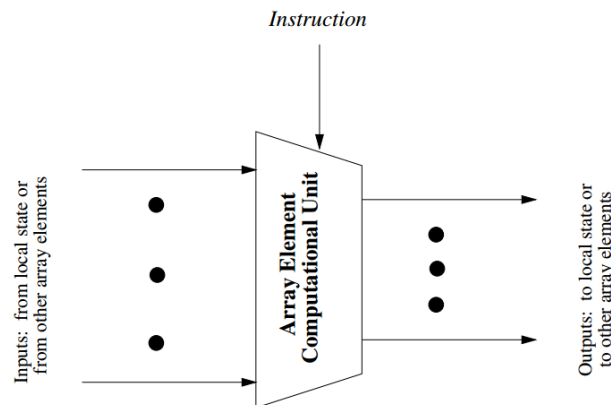
Flynnin ja Lukin (2011, s. 6) mukaan jonkun sovelluksen (application) toteuttamisen kannalta "Custom ASIC" ja "GPP" (general-purpose processor) muodostavat kaksi ääripäätä, jossa ensin mainittu tarkoittaa sovelluksen toimintojen toteutusta

hardwaressa ja jälkimmäinen sovelluksen toimintojen toteutusta softwaressa. Tässä Flynnin ja Lukin mallissa vain CGRA ja FPGA toteuttavat Estrinin esittämän ajatuksen (hardwaren tasolla) rekonfiguroitavasta tietokoneesta ja ne molemmat sijoittuvat energiatehokkuuden puolesta "Custom ASIC" ja "GPP" ääripäiden väliin. Edelleen Flynnin ja Lukin mukaan FPGA- ja CGRA-tekniikat eroavat toisistaan granulariteetin suhteen eli tyypillisesti FPGA koostuu hienojakoisista muutaman bitin levyisistä logiikkablokeista ja toisaalta CGRA koostuu karkeammista suuremman datalevyden logiikkablokeista. Tässä yksinkertaisessa mallissa Flynn ja Luk mieltävät ohjelmoitavuuden sovelluksen toimintojen toteutuksen jälkeisenä joustavuutena tai muunneltavuutena.

Ralstonin ja muiden (2003, s. 1351) ensyklopedian mukaan Michael Flynnin vuonna 1966 esittelemän rinnakkaisten arkkitehtuurien luokittelu jakaa tietokoneet neljään luokkaan: SISD (single instruction stream, single data stream), SIMD, MISD (multiple instruction stream, single data stream) ja MIMD (multiple instruction stream, multiple data stream). Denning ja Tichy (1990) kuvaavat SIMD:n olevan multiprosessori, jossa yksi kontrolliprosessori lähettää instructionit yksi kerrallaan kaikille muille niiden omassa paikallisessa muistissaan sijaitsevaa dataa käsitteleville prosessoreille. Edelleen Denningin ja Tichyn mukaan MIMD on puolestaan multiprosessori, jossa kukin prosessori voi suorittaa omaa erillistä ohjelmaansa. Edelleen Ralston ja muut toteavat liukuhihnoittamista käyttävien tietokoneiden sovittamisen Flynnin luokitteluun olevan vaikeaa, koska esimerkiksi liukuhihnoitettu vektoriprosessori pitäisi Flynnin määritelmän mukaan luokitella SISD tietokoneeksi ja toisaalta ohjelmoijan näkökulmasta se on enemmän SIMD tietokone.

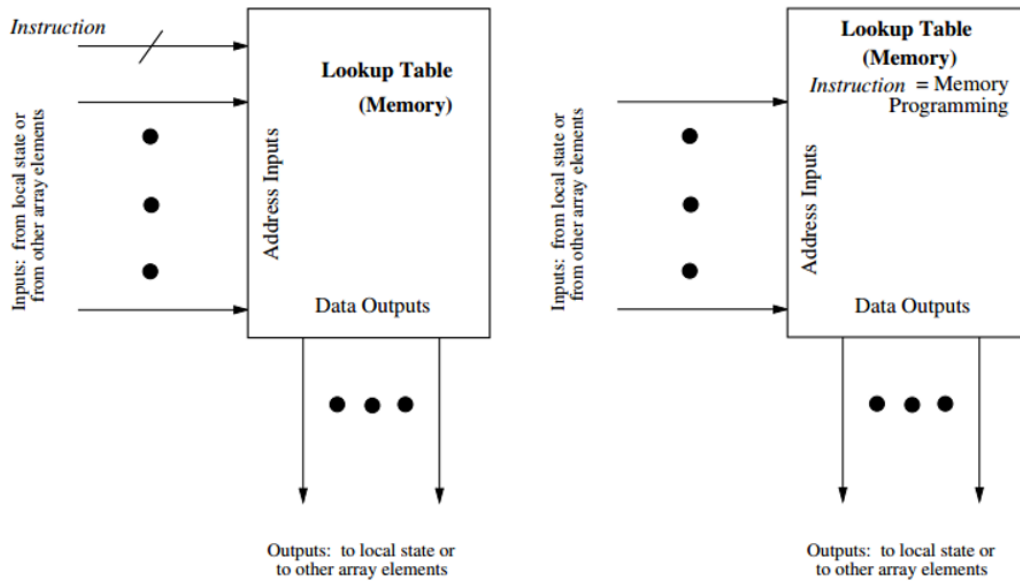
Bolotski ja muut (1994) esittivät SIMD:n ja FPGA:n arkkitehtuurit kattavan yhtenäisen laskennallisen ruudukon mallin (computational array model). Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan molemmat arkkitehtuurit koostuvat ruudukosta pieniä ja lukuisia prosessointielementtejä. Edelleen Bolotskin ja muiden yhtenäisessä mallissa laskennallinen ruudukko koostuu säännöllisestä hilasta (regular lattice) AE:itä eli

ruudukkoelementtejä (array element). Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan abstraktisti kukin AE suorittaa yksinkertaisen laskennan siihen tuleville inputeille tuottaakseen yhden tai useamman output bitin. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan inputit voivat tulla paikallisesta tilasta tai muilta AE:iltä kommunikaatiokanavia pitkin ja vastaavasti outputit joko tallennetaan paikalliseen tilaan tai kommunikoidaan muille AE:ille. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan instructionia eli käskyä käytetään määrittämään kunkin AE:n suorittama laskenta ja tyypillisesti sitä käytetään myös määrittämään kommunikaatiota ja paikallisen tilan manipulointia. Seuraava kuva 6 esittää periaatekuvan Bolotskin ja muiden yhtenäisen laskennallisen ruudukon mallin yhdestä AE:stä.



Kuva 6. Laskennallinen blokki array elementille (AE) Bolotskin ja muiden (1994) mukaan.

Bolotskin ja muiden (1994) yksinkertaisessa mallissa muunnos input-arvoista outputteihin mallinnetaan hakutauluna eli LUT:ina (lookup table). Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan instruction voidaan mallintaa joko LUT:in ohjelmointina (asetetaan sen sisältö) tai lisäinputteina hakutaulukkaan. Seuraava kuva 7 esittää nämä kaksi instructionin mallinnusvaihtoehtoa.



Kuva 7. Kaksi eri lookup mallia AE laskennalliselle yksikölle Bolotskin ja muiden (1994) mukaan.

Bolotskin ja muiden (1994) mukaan tässä yleisessä mallissa kutakin laskentajaksoa kohden olisi mahdollista antaa eri käsky kullekin AE:lle, mutta käskyjen distribuution resurssitarve ja käskyjen tarvittava siirtonopeus tulee suuruuden vuoksi mahdottomaksi käsitellä. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan FPGA heikentää yleistä mallia asettamalla instructionin staattiseksi eli instruction voi olla kullekin AE:lle yksilöllinen, mutta se ei käytännössä muutu suorituksen aikana. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan SIMD heikentää yleistä mallia asettamalla instructionin globaaliksi eli distribuimalla saman instructionin kullekin AE:lle. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan molemmat nämä kaksi tapaa voidaan nähdä space-time valintana ja molemmilla tavoin voidaan suorittaa mikä tahansa looginen operaatio. Edelleen Bolotskin ja muiden mukaan FPGA:ssa operaatio suoritetaan kokoamalla joukko operaation spatiaalisesti suorittavia AE:itä kun taas SIMD taulukossa operaatio suoritetaan askeltamalla ajallisesti läpi operaation suorittamiseen tarvittavia vaiheita suorittavia AE:itä.

Denningin ja Tedren (2019, s. 65) mukaan kaksi uutta tietokonearkkitehtuuria ovat saaneet erityistä huomiota: neuroverkot ja kvanttietokoneet. Edelleen Denningin ja Tedren mukaan neuroverkot ovat olleen viimeaikaisen tekoälykehityksen voimanlähteenä. Edelleen Denningin ja Tedren mukaan kvanttietokoneessa bitit

esitetään elektronien spin-tiloina ja niiden väliset yhteydet kvanttimekaanisina efekteinä kuten lomittumisena (entanglement) ja kvanttietokoneet voivat suorittaa jotkut laskennat paljon klassista tietokonetta (von Neumann arkkitehtuurin tietokone) nopeammin. Seuraavaksi tarkastellaan ensin neuroverkkoja ja sitten kvanttietokoneita.

McGraw-Hillin (2012, s. 753) ensyklopedian mukaan keinotekoinen neuroverkko (artificial neural network) on tietokoneohjelma, joka simuloi ihmisten kognitiivisesta toiminnasta vastaavan neuronijoukon käyttäytymistä. Ralstonin ja muiden (2003, s. 1233) ensyklopedia mainitsee tietokoneille haastavina ja ihmisille yksinkertaisina kognitiivisina toimintoina esimerkiksi visuaalisen patternin tunnistuksen ja puheen ymmärtämisen. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan neuroverkkoihin perustuvan laskennan lupaavuus perustuu tällaisten haastavien ongelmien nopeaan ratkaisuun massiivisen rinnakkaisuuden kautta. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan tällöin informaatiota ei siirretä laskentayksiköiden välillä vaan informaatio on enkoodattu hajautetulla tavalla interkonnektiivisuuden patternien kautta.

McGraw-Hillin (2012, s. 753) mukaan neuroverkossa kukin neuroni koostuu joukosta inputteja, joukosta kuhunkin inputtiin liittyvästä painokertoimista, päätösfunktiosta (tai kynnyksarvosta) ja outputista. Neuronit on ryhmitelty kerroksiin neuroverkon muodostamiseksi. Ralstonin ja muiden (2003, s. 1234) ensyklopedian kuvauksen mukaan neuroverkot koostuvat suuresta joukosta yksinkertaisia prosessointielementtejä, jotka vuorovaikuttavat toistensa kanssa eksitatoristen ja inhibitoivien yhteyksien kautta. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan neuroverkossa oppiminen saavutetaan yksinkertaisen säännön avulla, joka muokkaa yhteyksien painokertoimia reaktion input patterneihin. Edelleen Ralstonin ja muiden mukaan muutokset keskinäisen kytkennäisyyden asteessa (eli yhteyden painokertoimessa) mahdollistaa adaptoituvuuden uusiin tilanteisiin.

Neuroverkkoihin liittyen von Neumannin artikkeli vuodelta 1948 (Taub, 1963, s. 288) viittaa McCullochin ja Pittsin aiempaan tulokseen vuodelta 1943 ja nimittää heidän

järjestelmäänsä ”formaaliksi neuroverkoksi” (formal neural network), jossa mikä tahansa lukumäärä neuroneja on sopivasti kytketty toisiinsa valinnanvaraisella monimutkaisuudella. Von Neumannin mukaan tällaisen neuroverkon ”toiminta” (functioning) voidaan määritellä niin, että neuroverkosta valitaan jotkut sisääntulot ja valitaan jotkut lähdöt sekä kuvataan millaiset signaalit näissä sisääntuloissa aiheuttavat millaiset signaalit näissä lähdöissä. Von Neumannin mukaan merkittävin McCullochin ja Pittsin tulos oli se, että mikä tahansa rajallisella määrällä sanoja kuvattu tällainen ”toiminta” on mahdollista toteuttaa rajallisella formaalilla neuroverkolla.

NAS:n (2019, s. 15) mukaan kvanttilaskenta (quantum computation) on tähän mennessä ainoa laskennan malli, joka rikkoo laajennettua Church-Turingin teesiä ja siten ainoastaan kvanttietokoneet kykenevät ylittämään klassiset tietokoneet eksponentiaalisella nopeuserolla. NAS:n (2019, s. 54) mukaan suprajohtavat qubitit on toinen kahdesta johtavasta kvanttilaskennan teknologiasta. Edelleen NAS:n mukaan tämä lähestymistapa käyttää suprajohtavien materiaalien uniikkeja ominaisuuksia luomaan keinotekoisien atomin lailla toimivan kytkennän. Koska tämä kytkentä voidaan määrittää litografisesti samoin kuin integroidulle piirille, on mahdollista rakentaa näistä keinotekoisista atomeista koostuvia ruudukoita käyttäen samankaltaista prosessia kuin integroitujen piirien valmistuksessa. Edelleen NAS:n mukaan näiden ”atomien” tiloja manipuloidaan käyttämällä mikroaaltoja ja vierekkäisiä ”atomeja” voidaan kytkeä yhteen luomaan lomittuneita tiloja (entangled states). NAS:n (2019, s. 114) mukaan kvanttietokoneessa voidaan nimittää ”kvanttidatatasoksi” (quantum data plane) sitä osaa kvanttietokoneesta, missä qubitit sijaitsevat. Edelleen NAS:n mukaan tämän qubitteja sisältävän kvanttidatatason ”ohjelmointi” määrittää kvanttilaskennan funktion (kvanttilaskennan aikaiset) yhteydet. Edelleen NAS:n mukaan tämä muistuttaa jossain mielessä FPGA:n laskennan määrittämistä ohjelmoimalla logiikkablokkien funktioita ja niiden välisiä yhteyksiä. Edelleen NAS (2019, s. 115) kuvaa kvanttietokoneessa ”kontrolli- ja mittaustason” muuntavan (kvanttilaskentaa varten) suoritettavat kvanttioperaatiot kvanttidatatasolla sijaitseviin qubitteihin vaikuttaviksi

(ajallisesti peräkkäisiksi) kontrollisignaaleiksi ja mittaavan (kvanttilaskennan lopuksi) qubitien tilat.

2.3.3 Keskeisten aiheiden kartoitus

Dehon (2018) mukaan kolme varhaisinta ja arvovaltaisinta FPGA-tekniikkaan liittyvää konferenssia ovat vuodesta 1991 alkaen järjestettävä Field Programmable Logic and Applications (FPL), vuodesta 1992 alkaen järjestettävä International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (ACM/SIGDA FPGA) ja vuodesta 1993 alkaen järjestettävä IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). Leongin ja muiden (2017) mukaan vuosien mittaan FPL:stä on tullut suurin FPGA-teknologioita ja järjestelmiä käsittelevä tapaaminen. Näiden konferenssien ”Call for papers 2026” sisältämät aihealueet antavat kattavan ja ajantasaisen yleiskuvan FPGA-tekniikan tutkimusalueesta. Seuraavassa taulukossa 8 on tutkielmassa tehty kooste ja ryhmittely näiden kolmen FPL-, ACM/SIGDA FPGA- ja FCCM-konferenssien ”Call for papers 2026” aihealueista ryhmiteltynä aihealueryhmiin.

Taulukko 8. Kolmen konferenssin ”Call for papers 2026” aiheiden ryhmittely aihealueryhmiin.

Aihealueryhmä	Call for Papers 2026 aihealueet
Ryhmä 1 ”Teknologia”	Architectures and Technology, FPGA architecture, FPGA circuit design ja Custom computing and reconfigurable architectures
Ryhmä 2 ”Ohjelmointi”	Design methods and Tools, Use of AI/ML to improve design tools, Programming Models and Languages, CAD for FPGAs, High-level abstractions and Tools for FPGAs ja “Abstractions, programming models, and tools”
Ryhmä 3 ”Soveltaminen”	Application acceleration, High-Performance Computing, FPGA-based and FPGA-like computing engines, Applications and Design studies ja Applications

Ryhmä 4 "Rekonfigurointi"	Run-time reconfiguration, Sustainability of and through reconfigurable components, Run time reconfiguration ja Coarse-grain reconfiguration
Ryhmä 5 "AI/ML"	AI/ML for and on FPGAs ja AI/ML acceleration

Näiden keskeisimpien konferenssien lisäksi myös IEEE:n International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT), ACM:n "Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)", ACM/IEEE:n sponsoroima "International Symposium on Computer Architecture (ISCA)" sekä IEEE:n "International Conference on Application Specific Systems (ASAP), Architectures and Processors" julkaisevat merkittävästi FPGA-tekniikan tutkimusalueeseen liittyen. Seuraava taulukko 9 esittää kaikkien edellä mainittujen konferenssien julkaisujen kokonaismäärät ja julkaisujen määrät hakusanoilla "fpga*" ja "reconfigur*".

Taulukko 9. Keskeisien konferenssien julkaisujen kokonaismäärät ja määrät hakusanoilla "fpga*" ja "reconfigur*".

Haku	FPL	A/S FPGA	FCCM	ICFPT	ASPLOS	ISCA	ASAP
Kaikki	2 453	1 871	1 738	1 897	2 048	2 976	1 419
fpga*	1 868	1 871	1 320	1 324	354	416	359
reconfigur*	775	992	557	506	292	443	176

TCFPGA (2026) eli "ACM/SIGDA Technical Committee on FPGAs and Reconfigurable Computing" kertoo verkkosivuillaan heidän tarkoitukseseen tutkimuksen ja tutkijoiden edistämisen yhteisöstään ulospäin, tarjoavan opastusta uusille yhteisöön tuleville tutkijoille ja edistävän itsevalvontaa sisältäen myös tutkimusalueen suuntaviivojen identifiointia. TCFPGA:n mukaan he kokoavat "hall of fame":a (TCFPGA HOF) eli kunniagalleriaa vuosien mittaan merkittävän vaikutuksen saavuttaneista tutkimusalueen julkaisuista.

Näiden TCFPGA HOF:iin kuuluvien julkaisujen lisäksi seuraavaan ryhmittelyyn on otettu valikoima ARC:n ja ICFPT:n julkaisuista. Ensinnä vuodesta 2005 alkaen järjestetyn ”International Symposium on Applied Reconfigurable Computing (ARC)” konferenssin ensimmäisen 20 vuoden ajalta valitut edustavimmat julkaisut, jotka kuvaavat Cardoson ja Najjarin (2025) mukaan rekonfiguroitavan laskennan sovellusalueiden ja tutkimusaiheiden laajaa spektriä. Toiseksi ICFPT-konferenssin ”Best paper awards” julkaisuvalikoima vuosien 2003-2021 ajalta.

Seuraava taulukko 10 esittää TCFPGA HOF:iin kuuluvat yhteensä 97 kpl julkaisua sisältävät julkaisukokoelmat, ARC:n 26 kpl julkaisua sisältävän julkaisukokoelman sekä ICFPT:n 19 julkaisua sisältävän julkaisukokoelman, jotka sisältävät yhteensä kaiken kaikkiaan 142 kpl tutkijoiden itse merkittävänä ja keskeisenä pitämää FPGA-tekniikan tutkimusalueen julkaisua.

Taulukko 10. TCFPGA HOF:iin kuuluvat julkaisukokoelmat ja ARC:n julkaisuvalikoima.

Julkaisukokoelma	Lyhenne	Julkaisuja
FPL 25 years 1991-2014 ¹	FPL25	27
ACM/SIGDA FPGA 20 years 1992-2011 ²	FPGA20	25
IEEE FCCM 20 years 1993-2013 ³	FCCM20	25
ACM/SIGDA TCFPGA Hall of Fame 2017-2025 ²	TCFPGA HOF	20
ARC 20 years 2005-2024 ⁴	ARC20	26
ICFPT Best paper awards 2003-2021 ⁵	ICFPT19	19

¹Leong ja muut (2017) ²TCFPGA (2026) ³Poczek ja muut (2013) ⁴Cardoso & Najjar (2025)

⁵www.icfpt.org

Seuraavaksi nämä tutkijoiden itsensä koko tutkimusalueella merkittävänä pitämät julkaisut on kerätty ja ryhmitelty ”Call for papers 2026” perusteella tutkielmassa tunnistettujen tutkimusalueen aihealueryhmiin alle. Tällä tavalla on tarkoitus saada esille tutkijoiden itse merkittävänä pitämät keskeiset ja merkittävät tutkimusaiheet tutkimusalueen koko elinkaaren ajalta. Ryhmittely perustuu julkaisua tarkastelemalla

havaittuun julkaisun pääasialliseen sisältöön tai tavoitteeseen ja joidenkin julkaisujen tapauksessa niiden monipuolisen sisällön ja rinnakkaisten tavoitteiden vuoksi ne olisi mahdollista sijoittaa myös useampaan ryhmään. Tässä ryhmittelyssä ne on kuitenkin sijoitettu merkittävimmäksi tulkitun sisällön ja tavoitteen mukaan.

2.3.4 Aihealue 1: Teknologia

Teknologian aihealueella tunnistettiin ryhminä: yleinen teknologia, logiikka ja interconnect, network-on-chip interconnect, energiankulutus, IP:n (intellectual property) suojaamisen ongelma ja tietoturva, I/O ja rajapinnat, hard coret ja vikasietoisuus.

Yleisen teknologian ryhmässä aiheita ovat ensimmäisen FPGA-piirin XC2064 esittely (Carter ja muut, 1986), FPGA- ja SIMD-arkkitehtuurit kattava yleinen laskennallisen matriisin malli sekä DPGA-malli (dynamically programmable gate array) (Bolotski ja muut, 1994), FPGA-piirissä sen pinta-alaa kohden suuremman laskentakapasiteetin analysointi ja vertailu prosessoreihin (DeHon, 2000), empiirinen tutkimus FPGA-arkkitehtuurien evaluoinnissa käytettyjen oletusten, työkalujen ja tekniikoiden vaikutuksesta evaluointituloksiin neljältä kannalta eli LUT-taulun, switchblockin, optimaalisen klusterikoon ja on-chip memory array koon kannalta (Yan ja muut, 2002), PLA:n (programmable logic array) toteutus molekyylitason nanojohtimilla ilman litografiaa (DeHon & Wilson, 2004), vertailu 90 nm tekniikalla toteutettujen FPGA:n ja standard cell ASIC:in välillä logiikkatiheyden, piirin nopeuden ja energiankulutuksen suhteen (Kuon & Rose, 2007).

Logiikan ja interconnectin ryhmässä aiheita ovat analyysi LUT:ien ja interconnectin käyttöasteiden vaikutuksesta toisiinsa ja arean minimointi interconnectin käyttöastetta nostamalla (DeHon, 1999), HSRA (high-speed hierarchical synchronous reconfigurable array) eli maksimaaliselle kellotaajuudelle optimoitu arkkitehtuuri interconnectin hierarkkiseen rakenteeseen ja siihen lisättyjen pipeline-rekistereihin perustuen (Tsu ja muut, 1999), selvitys parhaista arvoista LUT-inputtimäärälle ja LUT-klusterikoolle paremmuus-kriteerin ollessa joko area, delay tai area-delay yhdistelmä (Ahmed & Rose,

2000), LUT-klusterien inputtien ja LUT-inputtien välisten kytkentöjen vähentäminen arean säästämiseksi ilman kriittisen polun viiveen kasvattamista (Lemieux & Lewis, 2001), direct drive muxin käyttö interconnect switcheissä arean pienentämiseksi (Lewis ja muut, 2003), PTB-pohjaisen (product term block) rekonfiguroitavan coren arkkitehtuuri ja sen vertailu LUT-pohjaiseen arkkitehtuuriin arean ja nopeuden suhteen tarkoituksena ollessa coren syntetisointi standard cell tekniikalla osaksi toista designia (Yan & Wilton, 2003), yksisuuntaisen ja single-driver johtimien paremmuus interconnectin toteutuksessa (Lemieux ja muut, 2004) ja ALM:n (adaptive logic module) eli frakturoitavan 6-LUT logiikkaelementin paremmuus nopeuden ja arean suhteen (Hutton ja muut, 2004).

Network-on-chip interconnect ryhmässä aiheita ovat kolmen erillisen NoC:n (matalan latenssin rekonfigurointi NoC, korkean bandwidthin data NoC, matalan latenssin kontrolli NoC) arkkitehtuuri tukemaan hardware-tasolla OS4RS:ssä (operating system for reconfigurable systems) hardware taskeja ja taskien relokaatiota (Marescaux ja muut, 2003), fyysisten linkkien uudelleenkäyttö ennakkoon staattisesti määritetyllä aikajaolla tai ajonaikaisesti pakettikytkentäisenä ja näiden menetelmien etujen vertailu eri tilanteissa (designin koko, kommunikation aktiivisuuden aste) (Kapre ja muut, 2006) ja mixed NoC- (hard router ja soft link) ja hard NoC-arkkitehtuurien (hard router ja hard link) vertailu arean, nopeuden ja energiatehokkuuden suhteen (Abdelfattah & Betz, 2013).

Energiankulutuksen ryhmässä aiheita ovat dynaamisen energiankulutuksen jakautumisen analyysi eri resurssien (logiikka, kello, I/O ja interconnect) välillä ja erilaisten interconnect-resurssien välillä (long, Oxbar, Hex, Double, IXbar) Virtex-II arkkitehtuurissa (Shang ja muut, 2002), energiankulutuksen vähennys minimaalisella vaikutuksella suorituskykyyn analysoimalla käyttäjän design ja konfiguroimalla sen nopeutta vaativille reiteille korkeampi V_{DD} -jännite ja muille hitaille reiteille alhaisempi V_{DD} -jännite (Gayasen ja muut, 2004), CMOS-transistorien aktiivisesta vuotovirrasta johtuvan tehohäviön vähennys asettamalla mahdollisimman moni hardware rakenne matalan vuotovirran tilaan valitsemalla LUT:eissa sopivia logiikkasignaalien tiloja

(Anderson ja muut, 2004), energiankulutuksen vähennys mittaamalla logiikan viive ja säättämällä syöttöjännitettä dynaamisesti (Chow ja muut, 2005) ja spatial vaihtoehdon toteaminen enemmän energiaa säästäväksi time-multiplexed ja spatial vaihtoehtojen vertailussa (Park ja muut, 2015).

IP:n (intellectual property) suojaamisen ongelman ja tietoturvan ryhmässä aiheita ovat IP corejen vesileimaus ja vesileiman tunnistus piirin virransyötöstä (Ziener & Teich, 2006), bitstreamin autentikointi (Drimer, 2007) ja public key salauksen ja PUF:ien (physical unclonable function) käyttö IP:n suojaamiseen (Guajardo ja muut, 2007).

I/O:n ja rajapintojen ryhmässä aiheita ovat "virtual wires" eli usean hitaan piirin sisäisen signaalin serialisointi nopeaksi signaaliksi ulkoiseen pinniin ja vastaavasti deserialisointi toisella piirillä (logiikkaemuloinnissa nopeuden kasvu ja piiritarpeen vähennys) (Babb ja muut, 1993), FPGA-piirin (XC3100A) maksiminopeuden (250 MHz) reunaehtojen selvitys sekä hyödyntäminen korrelaattorisovelluksessa (Von Herzen, 1997) ja FPGA:n liitäntä PC:n SDRAM DIMM-väylään (PC133, 133 MHz) (Leong ja muut, 2001).

Hard corejen ryhmässä aiheita ovat OneChip eli MIPS-kaltaisen hard CPU coren tiivis integrointi konfiguroitavan logiikan kanssa samalla piirillä (Wittig & Chow, 1996), MTJ-soluihin (magnetic tunnel junction) perustuvien suurikapasiteettisten non-volatile BRAM:ien (block RAM) evaluointi FPGA:n näkökulmasta (Tatsumura ja muut, 2016).

Vikasietoisuuden ryhmässä aiheita ovat Teramac-tietokone eli vikojen tunnistaminen hardwaressa ja niiden läsnäolosta huolimatta sovellusten onnistunut suoritus määppämällä sovellus uudelleen käyttämään vielä toimivia hardware-resursseja osittain viallisista FPGA-piireistä ja viallisista tai vikaantuvista piirien välisistä johdotuksista koostuvassa hardwaressa (Culbertson ja muut, 1997), ehdotus Teramac-tyyppiseen vikasietoiseen toimintaan nanomittaluokan tilastollisesti epätäydellisellä kemiallisella kokoonpanolla (chemical assembly) toteutetulla hardwarella (Heath ja muut, 1998), konfiguraatiomuistin jatkuva takaisinkirjoitus (scrubbing) SEU:iden (single event upset)

eli korkeaenergisten hiukkasten aiheuttamien bittivirheiden korjaamiseksi ja samanaikainen osittainen rekonfigurointi (Heiner ja muut, 2009) ja erilaiset vikasietoisuuden tekniikat ja evaluointi Ultrascale+ MPSoC (multi-processor system on chip) FPGA-piirillä mm. hard DSP-lohkon käyttö vs LUT:ien käyttö (Pagonis ja muut, 2023).

2.3.5 Aihealue 2: Ohjelmointi

Ohjelmoinnin aihealueella tunnistettiin ryhminä: logiikan mappaus LUT:eihin eli technology mapping, VPR:n (versatile place and route tool) kehitys ja CAD-algoritmit, liukuhihnoittaminen designissa, hardwaren strukturaalinen design ja generointi, behavioral synthesis tai HLS (high level synthesis) yleisesti tai yksittäiselle FPGA-piirille, behavioral synthesis tai HLS prosessorin ja FPGA:n yhdistelmälle, behavioral synthesis tai HLS usealle FPGA:lle tai järjestelmälle sekä accelerator overlay:n generointi ja API.

Logiikan mappauksessa LUT:eihin eli technology mappingin ryhmässä aiheita ovat Flowmap polynomiaalisen ajan algoritmi eli enintään K-inputin nodeilla Boolean verkon syvyyden minimoinnille optimaalinen ratkaisu (Cong & Ding, 1994), CutMap algoritmi eli FlowMapista parannettu algoritmi verkon syvyyden ja samalla myös arean minimoinnille huomioiden erityisesti kriittisellä polulla sijaitsevat nodet (Cong & Hwang, 1995) ja useissa teknologian mappausalgoritmeissa käytetyn cut enumeroinnin, cut rankingin ja cut pruningin parannukset (Cong ja muut, 1999).

VPR:n kehityksen ja CAD-algoritmien ryhmässä aiheita ovat Pathfinder eli negotiated congestioniin perustuva viiveen minimointia tavoitteleva router (McMurchie & Ebeling, 1995), itse VPR:n ensimmäinen versio eli avoimen lähdekoodin tutkimustyökalu erilaisten FPGA-arkkitehtuurien tutkimiseen ja vertailuun sovitettaessa eri arkkitehtuureille erilaisia kytkentöjä ja tukien sovittamisessa mm. packing, placement ja routing työvaiheita ja mahdollistaen arkkitehtuurien vertailun mm. nopeuden ja arean suhteen (Betz & Rose, 1997), Elmore-viivettä (mallinnettu RC-viive) tukevan timing-driver routerin lisäys VPR:ään ja sen käyttö erilaisia routing segmenttejä ja routing switchejä käyttävien arkkitehtuurien vertailuun speedin ja arean suhteen (Betz & Rose,

1999), selvitys LUT:ien klusteroinnin hyödyistä (speed, area, area-delay) vaihtelemalla klusterikokoa sekä T-VPACK timing-driven packing algoritmin lisäys VPR:ään (Marquardt ja muut, 1999), korkean tason FPGA:n routing arkkitehtuurin kuvauskielen ja sen pohjalta arkkitehtuurin generointityökalun lisäys VPR:ään (Betz & Rose, 2000), T-Vplace eli timing-driven placement algoritmin lisäys VPR:ään ja hyöty place-and-route jälkeisten viiveiden lyhentämisessä (Marquardt ja muut, 2000), erilaisille FPGA-arkkitehtuureille soveltuvan energiankulutuksen mallinnuksen (dynamic, short circuit ja leakage) lisäys VPR:ään (Poon ja muut, 2002), routing algoritmeissa RAM-muistitarpeen vähennys ja ehdotetut muutokset VPR:n routing algoritmiin (Chin & Wilton, 2007), TVPR (Transactional VPR) eli VPR:n placement-vaiheen rinnakkaistaminen TM:ään (transactional memory) pohjautuen ohjelmistopohjaisella TinySTM:llä (Birk ja muut, 2010), deterministinen rinnakkaistettu placement (Ludwin ja muut, 2008) ja maximum flow algoritmi mahdollisimman monen FPGA:n sisäisen signaalin kytkemiseksi sisäisiin trace buffer RAM-lohkoihin hyödyntäen designissa käyttämättömiä routing resursseja (Hung ja muut, 2013).

Liukuhihnoittaminen designissa ryhmässä aiheita ovat retimed modulo scheduling algoritmi designin liukuhihnoittamiseen ja liukuhihnoittamisen design spacen automaattiseen kartoitukseen erilaisten trade-offien näkökulmasta (throughput, power, energy, area) (Snider, 2002) ja korkeammalla tasolla eli systeemitasolla tehdyn sekä matalemmalla tasolla tehdyn liukuhihnoittamisen ja klusteroinnin energiankulutusta vähentävän vaikutuksen mittaus ja vertailu (Wilton ja muut, 2004).

Hardwaren strukturaalisen designin ja generoinnin ryhmässä aiheita ovat LDG:stä (logic description language) eli LISP:iin pohjautuvasta kielestä tarvittavien FPGA-konfiguraatioiden generointi Splash-arkkitehtuurille (32:sta FPGA:sta koostuva lineaarinen systolinen array) ja menetelmä generoitujen konfiguraatioiden debuggaamiseen konfiguraation takaisinluennalla (Gokhale ja muut, 1991), JBits eli Java-kielinen ohjelmointirajapinta (API, application programming interface) rekonfiguroitavan piirien resurssien (LUT, routing) kuvaamiseen, kokoonpanoon, parametrisoitavien

kirjastokomponenttien luomiseen sekä tuki generoida näistä Xilinxin FPGA:lle konfiguraatio eli bitstream tai muokata muulla työkalulla tehtyä bitstreamiä tai piiriltä takaisinluettua bitstreamiä mahdollistaen siten myös ajonaikaisesti rekonfiguroitavien sovellusten toteuttamisen (Guccione ja muut, 1999), parametrisoitavissa olevan ja generoitavan multi-port RAM-muistin toteutus uudella LVT-pohjaisella (live value table) menetelmällä hard RAM-lohkoihin perustuen ja vertailu muihin toteutuksiin (LUT tai multi-pumping) (LaForest & Steffan, 2010), FloPoCo eli parametrisoidun ja liukuhinnoitetun aritmeettisten operaatioiden datapolun generointi VHDL-kielelle C++-kielisestä määrittelystä tukien integer, fixed-point ja floating-point datatyyppejä (De Dinechin & Pasca, 2011), JHDL eli Java-kielinen osittain myös graafisella käyttöliittymällä varustettu CAD-työkalupaketti mahdollisesti ajonaikaisesti rekonfiguroitavien designien strukturaaliseen suunnitteluun, ohjelmalliseen strukturaaliseen suunnitteluun, simulointiin, suorittamiseen PC:llä ajettavana ohjelmana, netlistin generointi muita työkaluja varten, tuki hardwaressa suorittamiselle ja debuggaukselle Wildforce platformilla sekä tuki designin samanaikaiselle suoritukselle osittain PC:ssä ja hardwaressa riippuen mistä Java-luokasta designissa käytetty komponentti periytetään (Hutchings ja muut, 1999) ja Pyverilog eli Python-kielellä toteutettu työkalupaketti Verilog-kielisten hardware designien prosessointiin (parsinta, dataflow analysointi, control-flow analysointi ja Verilog koodin generointi) erilaisten CAD-työkalujen kehittämisen helpottamiseksi (Takamaeda-Yamazaki, 2015).

Behavioral synthesis tai HLS (high level synthesis) yleisesti tai yksittäiselle FPGA-piirille ryhmässä aiheita ovat sekventiaalisten (C ja FORTRAN) ohjelmien muistiaccessien analysointi ja niiden perusteella pienemmistä muisteista koostuvan partitioidun muistijärjestelmän koostaminen ja laskennan hajauttaminen spatiaalisesti sen sisällä käyttäen interconnectin staattista skedulointia ja generoiden Verilog-kielisen useasta prosessista koostuvan tilakoneen (Babb ja muut, 1999), StReAm eli pipelineattuja streaming arkkitehtuureita C++-kielisistä määrittelyistä dataflow graafin muodostamalla ja sen nodet PAM-Bloxilla generoituihin moduuleihin määppävä lopulta Xilinxin place ja route työkaluille sopivan netlistin tuottava kääntäjä (Mencer ja muut, 2000),

behavioraalisen synteessin scheduler (määrittää laskennan ja kommunikaation ajoitukset) perustuen erilaisten constrainien (resource, frequency, latency, relative timing) muuntamiseen SDC:hen (system of difference constraints) ja mahdollistaen globaalien optimoinnin linear programming (LP) menetelmällä (Cong & Zhang, 2006), loop unrollingin vaikutukset areaan, nopeuteen ja throughputtiin ROCCC:ssä eli C:stä VHDL:ään kääntäjässä (Buyukkurt ja muut, 2006), PARO eli funktionaalisella kielellä määritettyjen dataflow-tyyppisten sovellusten syntetisointi VHDL-kielelle (Hannig ja muut, 2008), FCUDA eli SPMD (single program multiple data) CUDA (compute unified device architecture) thread blokkien muuntaminen rinnakkaiseksi C-koodiksi ja sen kääntäminen AutoPilot HLS-työkalulla FPGA:lle (Papakonstantinou ja muut, 2009), VLIW-SCORE eli SCORE:n streameihin ja FIFO:ihin perustuvan TDF-kielellä (task description format) määritetyn ohjelman kääntäminen simulointiajajojen operaatioiden esiintymistiheyden mukaan generoiduille VLIW-pohjaisille engineille (Kapre & DeHon, 2011) ja C-kielisistä ohjelmista HLS:ssä uudelleenkäytettävien toiminnallisten makrojen tunnistus automaattisesti LLVM-kääntäjän generoiman IR:n (intermediate representation) basic blokkien pohjalta tai käyttäjän manuaalisesti valitsemista C-funktioista ja HLS:n nopeutus näitä makroja hyödyntämällä (Gort & Anderson, 2014).

Behavioral synthesis tai HLS prosessorin ja FPGA:n yhdistelmälle ryhmässä aiheita ovat PRISM (processor reconfiguration through instruction-set metamorphosis) eli yhtenäinen menetelmä C-kielisen ohjelman erottelulle funktiotasolla sekä osien kääntämiselle software ja hardware imageiksi ohjelman suoritusta varten 16-bittisen väylän yhdistämälle prosessorin ja neljän FPGA:n yhdistelmälle (Athanas & Silverman, 1993), PRISC (programmable instruction set computer) eli arkkitehtuuri RISC-mikrokontrollerin käskykannan laajentamiselle sovelluskohtaisilla käskyillä ja näitä suorittavien 3-tason kombinatoriseen logiikkaan kykenevien PFU:iden (hardware-programmable functional unit) liittäminen suoraan mikrokontrolleriytimeen sekä automaattinen kääntämis/syntetisointimenetelmä PFU:illa suoritettavien sovelluskohtaisten käskyjen extractointiin ja hyödyntämiseen geneerisistä C-ohjelmista (Razdan & Smith, 1994), menetelmä löytää C-kielisistä prosessorin peruskäskykanta

käyttävistä ohjelmista koko ohjelman suoritusajan puolesta optimaalisimmat käskykanta laajentavat ja FPGA:lla toteutettavat käskyvaihtoehdot ja niiden toteutus (Cong ja muut, 2004), kartoitus käskykannan laajentamisen ongelmasta (Galuzzi & Bertels, 2008) ja suoritusajan nopeuttamiseksi ARM-prosessorille käännetystä binäärikoodista coarse-grained rinnakkaisuuden löytäminen ja sen hyödyntäminen laskenta-intensiivisten affiinisten looppien kiihdyttämiseksi FPGA:lla koostuen ensin offline vaiheesta (C-kielelle decompileointi, analysointi ja HLS-synteesi) sekä toiseksi online vaiheesta varmistuen offline vaiheessa generoidun FPGA-toteutuksen käyttökelpoisuuden tarkastamalla offline vaiheessa tehtyjen rinnakaistamisoletuksien voimassaolo (Cheng ja muut, 2017).

Behavioral synthesis tai HLS usealle FPGA:lle tai järjestelmälle ryhmässä aiheita ovat MATCH (Matlab compiler for heterogeneous computing systems) eli integroitu käännösympäristö MATLAB-ohjelmien kääntämiseen VME- ja Ethernet-väylillä yhdistetylle heterogeeniselle joukolla prosessoreita (FPGA, DSP, sulautettu prosessori) automaattisella tai käyttäjän määrittämällä ohjelman osien mappauksella eri prosessoreille (Banerjee ja muut, 2000) ja Streams-C ohjelmointijärjestelmä eli laajennettuun C-kieleen ja siinä dataa kuljettavien streamien ja streameja PC:ssä tai FPGA:lla käsittelevien prosessien kääntäminen ja simulointi kohdejärjestelmän ollessa PCI- tai VME-väylillä PC-tietokoneeseen liitetyt usean FPGA:n sisältävät laajennuskortit ohjelmoijan määrittämällä prosessien sijoittelulla (Gokhale ja muut, 2000).

Accelerator overlay:n generoinnin ja API:n ryhmässä aiheita ovat TaPaSCo (task parallel systems composer) eli käyttäjän omista T-modelin rajapinnat (control channel, signaling channel, data channel) toteuttavista hardware PE:istä (processing element) eri tyyppiset PE:t käyttäjän määrittämien PE:iden lukumäärien mukaan omiin klustereihin kokoava ja niille ohjelmistopuolella näihin T-modelin rajapintoihin perustuvat API-funktiot (käyttäjän omassa ohjelmassa laskentaa suorittaville rinnakkaisesti ajettaville taskeille ja taskien sisällä toisistaan riippumatta laskentaa suorittaville jobeille) tarjoava automattinen toolflow kokonaisten SoC designien generointiin laajalle joukolle FPGA

platformeja ja samalla työkalu SoC designin DSE:hen (design space exploration) kolmella ulottuvuudella eli kellotaajuus, arean käyttö sekä käyttäjän määrittämät design variantit PE:lle (kuten hard RAM-lohkojen käyttö, liukuhihnan vaiheiden lukumäärä tai FIFO:n koko) (Heinz ja muut, 2021) ja TaPaSCo:ssa lapsitaskien käynnistämisen ja skeduloinnin toteutus host prosessorin sijaan on-chip eli FPGA:ssa (Heinz & Koch, 2021).

2.3.6 Aihealue 3: Soveltaminen

Soveltamisen aihealueella tunnistettiin ryhminä soft prosessorit (Cheah ja muut, 2012), aritmetiikka, "string ja pattern matching", kuvan ja videon prosessointi, kryptografia sekä "simulations and solvers".

Aritmetiikan ryhmässä aiheita ovat kertolasku erityisesti FIR- ja FFT-laskennoissa (Petersen & Hutchings, 1995), CORDIC-laskennat (Andraka, 1998), Floating-point ja MAC-operaatiot (multiply accumulate) (Underwood, 2004), Floating-point ja vektorien pistetulo, matriisin ja vektorin kertolasku sekä matriisien kertolasku (Underwood & Hemmert, 2004), residue aritmetiikka (Fu ja muut, 2008), approximate arithmetic (Ansaloni ja muut, 2020), sparse matrix vector kertolasku (Mpakos ja muut, 2024).

String ja pattern matching ryhmässä aiheita ovat haku DNA tietokannasta (edit distance ja Smith-Waterman algoritmi) 43 miljardia CUPS (cell updates per second) (Hoang, 1993) ja 814 miljardia CUPS (Yu ja muut, 2003), regular expression matching NFA:lla (non-deterministic finite automata) (Sidhu & Prasanna, 2001), string matching network intrusion detection (NID) järjestelmässä (Hutchings ja muut, 2002), 2 Gbps Granidit NID-järjestelmä verkkopakettien suodatukseen (Gokhale ja muut, 2002), 10 Gbps NID-järjestelmä verkkopakettien suodatukseen (Sourdis & Pnevmatikatos, 2003) ja yhteenveto regular expression ratkaisusta, avoimista kysymyksistä ja toteutuksista (Bispo ja muut, 2007).

Kuvan ja videon käsittelyn ryhmässä aiheita ovat plugin-pohjainen videon reaaliaikainen käsittelyjärjestelmä (SONIC) (Haynes ja muut, 1999) ja vertailu kuvan käsittelyn kannalta

CPU:n (SIMD), GPU:n ja FPGA:n välillä (Asano ja muut, 2009). Kryptografian ryhmässä aiheita ovat PK (public key) kryptografiset järjestelmät kuten RSA (Rivest-Shamir-Adleman) ja ECC (elliptic curve cryptography) (Sakiyama ja muut, 2006), NIST:n (National institute of standardads and technology) SHA-3 hash-algoritmikilpailun algoritmit (Baldwin ja muut, 2010), ECC instanssi Curve25519 ja turvallisuus side-channel power analyysiä vastaan (Sasdrich & Güneysu, 2015).

Simulaatioiden ja solverien ryhmässä aiheita ovat logiikkaemulointi eli VLSI-piirille tarkoitettujen digitaalisten designien nopea simulointi (Varghese ja muut, 1993), Boolean satisfiability (SAT) solver (Zhong ja muut, 1998), MD-simulaatio (molecular dynamics) (Azizi ja muut, 2004), conjugate gradient algoritmi systems of linear equations ratkaisemiseen (Lopes & Constantinides, 2008), LSMC-menetelmä (least-squares Monte Carlo) amerikkalaisten optioiden hinnoittelun simuloinnissa (Tian & Benkrid, 2009), iteratiiviset menetelmät systems of linear equations ratkaisemiseen ja muistibandwidthin optimointi niiden käyttämissä matriisin ja vektorin välisessä kertolaskussa (Boland & Constantinides, 2010), globaalil ilmaston mallinnuksen matalan veden yhtälöiden ratkaisu (Gan ja muut, 2013).

2.3.7 Aihealue 4: Rekonfigurointi

Rekonfiguroinnin aihealueella tunnistettiin ryhminä: yleinen rekonfiguroinnin tutkimus ja varhaiset sovellukset, RTR-ajan (run-time reconfiguration) lyhentäminen, virtuaalisen hardwaren malli ja toiminnallisuuden aikajako, käyttöjärjestelmämalli ja hardware taskit, CGRA:t sekä muu kuin FPGA-pohjainen rekonfigurointi.

Yleisen rekonfiguroinnin tutkimuksen ja varhaisten sovellusten ryhmässä aiheita ovat FPGA:iden osittainen rekonfigurointi, itsensä itsenäisesti rekonfiguroiva FPGA ja toiminnallisuuden vaihtaminen ikään kuin välimuistin kaltaisesti (Lysaght & Dunlop, 1994), DPGA-piirin malli (dynamically programmable gate array) eli FPGA:n resurssien hyödyntämistason ja uudelleenkäytön parantaminen lisäämällä piirille useampi kuin yksi toiminnan määrittävä konfiguraatiomuisti ja kyky vaihtaa dynaamisesti

konfiguraatioiden välillä (multikonteksti) (DeHon, 1996), PAM (programmable active memory) eli FPGA-pohjainen rekonfiguroitava järjestelmä ja sillä ajettavat nopeaa rekonfiguroitavuutta edellyttävät sovellukset (mm. RSA eli kryptografinen laskenta, stereonäkö sekä pitkä Viterbi dekooderi ja dekooderille optimaalisen gainin tuottavan koodin haku) (Vuillemin ja muut, 1996), nopealla FPGA:n rekonfiguroinnilla SAR-tutkakuvasta automatisoitu kohteiden tunnistus korreloimalla osia tutkakuvasta suureen määrään ”kohdetemplateja” kertaluokkaa nopeammin kuin yleiskäyttöisillä prosessoreilla toteutuilla järjestelmillä (Villasenor ja muut, 1996) ja Xilinx FPGA-piireille parannettu tuki osittaiselle ajonaikaiselle rekonfiguroinnille arkkitehtuurissa (pre-routed bus makrot kommunikaatiolle staattisen ja rekonfiguroitavan alueen välillä, pienimmän rekonfiguroitavan alueen pienennys ja sisäisen konfigurointioheislaitteen eli ICAPin nopeutus) sekä CAD-työkalut ja prosessi näiden parannusten hyödyntämiselle (Lysaght ja muut, 2006).

RTR-ajan (run-time reconfiguration) lyhentämisen ryhmässä aiheita ovat FPGA:n koko konfiguraation vaihto yhdessä kellojaksossa (30 ns) johonkin kahdeksasta konfiguraatiovaihtoehdosta (Trimberger ja muut, 1997), nopeampi FPGA-piirin osittainen konfigurointi pakkaamalla konfiguraatiodataa ja käyttäen piirillä sijaitsevaa kiinteää wildcard-toimintaa tukevaa dekooderia (Hauck ja muut, 1998), FPGA-piirin konfiguraatiomuistin tarkastelu ikään kuin välimuistina prosessoinnissa tarvittaville eri toiminnoille ja erilaiset välimuistin hallintamenetelmät eri toimintojen rekonfigurointiin kuluvan kokonaisajan minimoimiseksi (Li ja muut, 2000), osittaisen rekonfiguroinnin maksiminopeuden selvitys ja modifioitu ylikellotettu konfigurointi (Claus ja muut, 2010) ja konfiguraation pakkaus ja 800 MB/s ylikellotettu rekonfigurointi (Duhem ja muut, 2012).

Virtuaalisen hardwaren mallin ja toiminnallisuuden aikajaon ryhmässä aiheita ovat DISC (dynamic instruction set computer) eli käskykannan virtualisointi rajattomalle määrää käskyjä ja sitten ajonaikaisesti hardwaren konfigurointi vain juuri suoritettavan käskyn mukaisella toteutuksella (tai pienellä määrällä juuri tarpeellisten käskyjen toteutuksia)

(Wirthlin & Hutchings, 1995), hardwaren virtualisointi rajattomalle määrää jonkin toiminnon toteuttavia kaksiulotteisia SLU:ita (swappable logic unit) ja sitten ajonaikaisesti hardwaren konfiguroinnin ja SLU:iden fyysisen sijoittelun hallinnointi sekä käsitteellisesti SLU:iden määrittely toisistaan riippumattomiksi ("sea of accelerators"-virtualisointimalli) tai toistensa kanssa kommunikoiviksi ("parallel harness"-virtualisointimalli) (Brebner, 1996), striped FPGA:n rekonfiguroinnin malli eli FPGA:n jakaminen liukuhinamaisen laskennan eri vaiheiden mukaisesti konfiguraatiostripeihin ja näiden konfiguraatiostripejen liu'utus liukuhinnan vaiheiden etenemisen mukaisesti FPGA:n lävitse (Schmit, 1997), PipeRench eli hardwaren virtualisointi perustuen liukuhinnan vaiheiden tasolla ajonaikaisesti rekonfiguroitavaan arkkitehtuuriin (Cadambi ja muut, 1998), SCORE (stream computation organized for reconfigurable execution) eli laskennan kuvaaminen ja organisointi perustuen streameihin ja laskennassa käytettävien rekonfiguroitavien resurssien (laskenta, muisti, kommunikaatio) virtualisointi kiinteäkokoiisiin "sivuihin" ja sitten ajonaikaisesti virtuaalisten sivujen ajo käytettävissä olevalla hardwarella aikajakoon perustuen (Caspi, Chu, Huang, Yeh, Markovskiy ja muut, 2000; Caspi, Chu, Huang, Yeh, Wawrzynek ja muut, 2000) sekä ReCoBus ja ReCoBus-builder eli arkkitehtuuri ja työkalu ajonaikaisesti (dynaamisesti) rekonfiguroitavien järjestelmien generointiin perustuen logiikkaelementeissä määritettyihin resurssialueisiin ja mahdollistamalla tällaisten ajonaikaisesti vaihdettavien ja vapaasti sijoitettavien hardware moduulien kommunikaatio joustavan väyläarkkitehtuurin (ReCoBus) ja point-to-point yhteyksien (I/O-bar) välityksellä (Koch ja muut, 2008; Oetken ja muut 2010).

Käyttöjärjestelmämallin ja hardware taskien ryhmässä aiheita ovat multitaskingin toteutus pre-emptiivisesti rekonfiguroinnin avulla eli FPGA:n suoritus keskeytetään pysäyttämällä task switchiä varten kello ja kaikki tilatieto eli hardware taskin konteksti (konfiguraatio, sisäiset tilat ja mahdollinen FPGA:han liitetty RAM-muisti) luetaan ja tallennetaan erilliseen muistiin ja korvataan toisen hardware taskin kontekstilla (Simmler ja muut, 2000), vaihtelevan levyisten sarakemaisten hardware taskien nopea relokaatio (taskin suspend, sisäisten tilojen luku, deallokointi sekä taskin restore uudella

ajanhetkellä uuteen sijaintiin) (Kalte & Pormann, 2005), ReconOS eli multithreaded programming modelin laajennus rekonfiguroitavalle hardwarelle määrittämällä software ja hardware taskeille yhtenäinen menetelmä threadien väliselle kommunikaatiolle (semaforit, mutexit, konditiomuuttujat, message queue/mail box sekä jaettu muisti) ja menetelmä hardware taskien pre-emptiiviselle task switchille ja menetelmän integrointi ReconOS-käyttöjärjestelmään (Happe ja muut, 2015).

CGRA:iden ryhmässä aiheita ovat 8-bittisistä yksiköistä koostuva MATRIX (Mirsky & DeHon, 1996), Chimaera eli tiukasti RISC-prosessorin ja sen rekisterien yhteyteen niiden kellotaajuutta hidastamatta integroitu kustomoitujen käskyjen suorittamiseen ilman flip-floppeja tarkoitettu FPGA:ta muistuttava rekonfiguroitava matriisi (Hauck ja muut, 1997), Garp eli MIPS-prosessorin kanssa integroitu rekonfiguroitava matriisi (Hauser & Wawrzynek, 1997), MIPS:in kaltaiseen prosessoriin co-prosessorina integroitu hardwaren virtualisoiva valinnaisella määrällä konteksteja (1-8 kpl) varustettu CGRA (Enzler ja muut, 2003), ADRES eli VLIW-prosessorin kanssa tiukasti integroitu CGRA ja ohjelmien kääntäminen C-kielestä ADRES-arkkitehtuurille (Mei ja muut, 2003), "Ambric" eli Kahn prosessiverkon kaltainen rajatuilla puskureilla varustettu rekonfiguroitava matriisi sisältäen 360 kappaletta 32-bittisiä RISC-prosessoreita ja ohjelmien kääntäminen sille Java-kieleen ja lohkokaavioihin perustuvasta ohjelmointimallista (Butts ja muut, 2007), ADRES-arkkitehtuurin pohjalta vertailu 14:a erilaisen interconnect-arkkitehtuurin välillä energiankulutuksen ja laskennan nopeuden kannalta (IDCT- ja FFT-sovelluksilla) (Bouwens ja muut, 2007) ja sovellusten tehokkaampi skedulointi CGRA:lle hyödyntäen kulkureittien jakamista sovelluksen DFG:ssä (data flow graph) (Chen & Mitra, 2012).

Muussa kuin FPGA-pohjaisessa rekonfiguroinnin ryhmässä aiheena on RaPiD (reconfigurable pipelined datapath) eli lineaarinen identtistä funktionaalisista uniteista rakentuva staattisilla ja dynaamisilla ohjaussignaaleilla sovelluksen tarpeisiin rekonfiguroitava liukuhihna (Ebeling ja muut, 1996).

2.3.8 Aihealue 5: AI/ML

AI:n (artificial intelligence) ja ML:n (machine learning) aihealueella tunnistettiin ryhminä: CNN:n (convolutional neural network) kiihdytys, CNN-pohjainen kuvan prosessointi ja objektin tunnistus, AI (artificial intelligence) mallin ja datan redundanssin vähentäminen sekä muut kuin pääasiassa CNN-pohjaiset aiheet.

CNN:n kiihdytyksen ryhmässä aiheita ovat throughputin kasvattaminen latenssin kustannuksella (Chan ja muut, 2019), optimaalisen hardware konfiguraation haku tarkemmalla latenssin ennusteella (Ferianc ja muut, 2020) sekä konvoluutiotasojen kiihdytys (Zhang ja muut, 2015).

CNN-pohjaisen kuvan prosessoinnin ja objektin tunnistuksen ryhmässä aiheita ovat malli resurssikäytön ennustamiselle riippuen CNN arkkitehtuurin parametreista ja optimointikulku (optimisation flow) CNN-pohjaisille objektin tunnistusalgoritmeille (Zhao ja muut, 2017), vähäiselle latenssille optimoitu parametrisoitu arkkitehtuuri YOLOv3-Tiny mallille objektien tunnistamiseksi (Yu & Bouganis, 2020) sekä HiFlipVX-kirjastoon integroidut streamausta tukevat ja parametrisoitavat toteutukset yleisesti CNN algoritmeissa käytettävistä seitsemästä kerroksesta (3D convolution, depthwise convolution, pooling, activation, batch normalization, fully connected sekä softmax) (Kalms ja muut, 2021).

AI (artificial intelligence) mallin ja datan redundanssin vähentämisen ryhmässä aiheita ovat suunnittelukehys hakea halutun time-space tradeoffin toteuttava approksimoiva versio LSTM-mallista (long short term memory) mallia pakkaamalla ja karsimalla sekä tällaisten approksimoivien LSTM-mallien suorittamiseen kehitetty arkkitehtuuri (Rizakis ja muut, 2018), MobileNet-mallissa mallin redundanssin ja datan redundanssin kvantitatiivinen analyysi ja vähennetyin redundanssin RR-MobileNet-malliversioon toteutus (Su ja muut, 2018), binaarisessa neuroverkossa kvantisoinnista johtuvien virheiden vähentäminen ditheröinnin avulla (Ando ja muut, 2018).

Muiden kuin pääasiassa CNN-pohjaisten ryhmässä aiheita ovat päätöspuiden läpikäymisen sijaan niiden kuvaaman piirreavaruuden läpikäymiseen perustuva DF (decision forest) inferenssimenetelmä ja tähän perustuva joustava toteutusarkkitehtuuri (Van Chu ja muut, 2021), CNN- ja SNN-kiihdytyksen (spiking neural network) suorituskyvyn ja energiatehokkuuden vertailu ja SNN:n energiatehokkuuden parantaminen uudella enkoodauksella ja muistin organisointitekniikalla (Plagwitz ja muut, 2024).

2.4 Yhteenveto

Bibliometrisen analyysin taustateorian ja kahden kohdetutkimusalueen esittelyn jälkeen siirrytään tutkielman menetelmään ja aineistoon.

3 Menetelmä ja aineisto

Tämä luku esittelee tutkielman menetelmän ja aineiston. Ensimmäisessä aliluvussa tarkastellaan tietokantojen kartoitusta ja aineiston hakua tietokannoista. Toisessa aliluvussa tarkastellaan SCOPUS-tietokannasta haetun aineiston ominaisuuksia. Kolmannessa aliluvussa tarkastellaan tutkimusaiheiden löytämisen ja tilastoinnin menetelmiä.

3.1 Tietokantojen kartoitus ja aineiston haku

Tässä aliluvussa esitellään tutkielmassa käytettyjen tietokantojen kartoitus ja aineiston haku tietokannoista. Tietokantoja ja niiden sisältämien julkaisujen lukumääriä selvitettiin www.searchsmart.org sivustolta (2.9.2025). Tätä sivustoa on käytetty myös aiemmassa tutkimuksessa tietokantojen selvittämiseen (Gusenbauer, 2024). Seuraavaan taulukoon 11 on valittu 18 kpl mahdollisimman suuren julkaisumäärän sisältäviä tietokantoja.

Taulukko 11. Julkaisutietokantojen vertailu.

Tietokanta	Julkaisujen määrä (miljoonaa)	Abstraktin export-toiminto
Google Scholar	389	Ei
Bielefeld Academic Search Engine (BASE)	275 (467)	Ei ¹
Naver Academic	252 (339)	Ei
Internet Archive Scholar	250	Ei
OpenAlex	248 (463)	Ei
Lens.org	236 (294)	Kyllä
CORE	220 (424)	Ei ²
Semantic Scholar	204 (231)	Ei ²
Scinapse	200	Ei
WorldCat	182 (440)	Ei
Scilit	164 (182)	Ei ¹

Tietokanta	Julkaisujen määrä (miljoonaa)	Abstraktin export-toiminto
OpenAIRE	164 (325)	Ei ²
Scite	150 (212)	Ei ¹
Dimensions - Publications	136 (161)	Kyllä
Crossref	131 (178)	Ei ¹
Mendeley	114	Ei
Scopus	85 (103)	Kyllä
Web of Science Core Collection (WOSCC)	80 (97)	Kyllä

¹Mahdollisesti kirjautumalla. ²Mahdollisesti API access-toiminnon avulla.

Kunkin tietokannan omilta sivuilta selvitettiin ajankohtainen tietokannan sisältämien julkaisujen lukumäärä (12.12.2025) ja taulukossa on esitetty lukumäärän yhteydessä suluissa tämä ajankohtaisempi tieto. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on esitetty tietokannan tuki export-toiminnolle julkaisujen abstraktien hakemiseen omalle tietokoneelle tarkempaa julkaisujen analysointia varten. Osa tietokannoista ei tue abstraktien export-toimintoa, mutta näitäkin tietokantoja voi käyttää tietolähteenä arvioimaan tiettyä sanahakua vastaavan julkaisupopulaation yleisiä ominaisuuksia. Tällaisia yleisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi julkaisujen kokonaismäärä, julkaisupopulaatiossa vanhimman ja uusimman julkaisun ajankohdat, julkaisujen lukumäärät vuosikohtaisesti sekä julkaisujen siteerausten lukumäärät.

Tutkielmassa valittiin julkaisutietokantojen joukosta SCOPUS-tietokanta aineistohaun lähteeksi sen riittävän edustavuuden vuoksi. Julkaisutietokantojen tutkimusaluekohtainen vertailu ja SCOPUS-tietokannan tutkimusaluekohtainen edustavuuden arviointi esitetään julkaisupopulaatioita esittelevässä luvussa 4.

Tutkielmassa aineiston haku tehdään sanahakuna valitusta tietokannasta. Yleisesti ottaen sanahaku voidaan tietokannasta riippuen tehdä rajoituksetta käyttäen kaikkea julkaisussa esiintyvää tekstisisältöä tai rajata sanahaku käyttämään esimerkiksi vain yhtä

tai useampaa seuraavista tietokentistä: julkaisun otsikko, abstrakti tai avainsanat. Rajoituksettomassa sanahaussa hakutulokseen tulee mukaan erittäin suuri määrä julkaisuja, jotka eivät sinänsä käsittele haettavaa aihetta, vaan ainoastaan mainitsevat sen sivumennen. Tällainen haku on käyttökelpoinen antamaan käsityksen kaikesta haetun aiheen ympärillä käytävästä tieteellisestä keskustelusta. Tutkielmassa halutaan kuitenkin tarkastella vain pääasiassa sanahaun aihetta käsitteleviä julkaisuja ja sanahaku rajataan käyttämään vain julkaisun otsikkoa, abstraktia tai avainsanoja. Hakutuloksesta tallennetaan export-toiminnolla omalle tietokoneelle julkaisujen bibliografiset tiedot, julkaisuihin liitetyt avainsanat sekä abstraktit.

3.2 SCOPUS-tietokannasta haettu aineisto

SCOPUS-tietokannasta suoritettiin aineistohaut (18.2.2026) kahdella hakusanalla. Aineistohaku rajattiin sisältämään seuraavat dokumenttityypit: "article", "conference paper" ja "review". Toistettavuuden vuoksi aineistohaku rajattiin sisältämään vuoden 2025 dokumentit, mutta ei uudempia. Aineistohaut suoritettiin rajatun export-toiminnon vuoksi useammassa erässä ja eräkohtaiset tiedostot yhdistettiin jälkikäteen. Hypespektrikuvantamisen tutkimusalueen hakusana oli: "TITLE-ABS-KEY(hyperspectr*) AND PUBYEAR > 1978 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re"))" ja FPGA-tekniikan tutkimusalueen hakusana oli: "TITLE-ABS-KEY (fpga*) AND PUBYEAR > 1977 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re"))". Seuraava taulukko 12 esittää SCOPUS-tietokannan aineistohakujen tulokset.

Taulukko 12. Aineistohakujen tulokset SCOPUS-tietokannasta.

Aineiston ominaisuus	hyperspectr*	fpga*
Aikaväli	1979 - 2025	1978 - 2025
Dokumenttien määrä	65 646	111 664
Artikkeli (article)	40 250 (61,3 %)	38 490 (34,5 %)
Konferenssijulkaisu (conference paper)	23 592 (35,9 %)	72 528 (65,0 %)
Katsausartikkeli (review)	1 804 (2,7 %)	646 (0,6 %)

SCOPUS-aineiston dokumenttien lukumäärä on yhteensä 177 310 dokumenttia, mutta 325 dokumenttia sisältyy molempiin aineistoihin. Uniikkien dokumenttien lukumäärä on tästä johtuen yhteensä 176 985 dokumenttia.

Viittausten analyysiä varten haetun SCOPUS-aineiston tutkimusalueen dokumentit järjestettiin dokumentin saamien viittausten lukumäärän mukaan laskevaan järjestykseen. Tämän järjestyksen perusteella haettiin manuaalisesti (28.2.-1.3.2026) tutkimusalueen TOP100 viitatuun dokumentin kaikki SCOPUS-tietokannasta saatavilla olevat lähdedokumentit (references) tutkimusalueen viittausten analyysiä varten. Manuaalisessa lähdedokumenttien haussa hakukomento oli "CITEID()" ja parametrina SCOPUS-tietokannan EID-kentästä saatava dokumentin yksilöllinen tunniste. Haettujen lähdedokumenttien lukumäärät on esitetty seuraavassa taulukossa 13.

Taulukko 13. Manuaalisesti haettujen TOP100 viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden lukumäärät.

TOP100 viitatuissa julkaisuissa	hyperspectr*	fpga*
Lähteiden lukumäärä	6 031	3 784
Lähteistä uniikkien lähteiden lukumäärä	4 533	3 272

3.3 Tutkimusaiheiden löytäminen ja tilastointi

Tässä aliluvussa tarkastellaan tutkimusaiheiden löytämisen ja tilastoinnin menetelmiä. Tutkimusaiheiden löytämisen kannalta aineisto sisältää tietoa seuraavissa tietokentissä: tekijän avainsanat, indeksin avainsanat, otsikko ja abstrakti. Seuraava taulukko 14 esittää tutkielmaan valitut ja siinä käytetyt termien löytämisen ja tilastoinnin menetelmät sekä menetelmiin liittyvät ohjelmat.

Taulukko 14. Tutkielmassa käytetyt termien löytämisen ja tilastoinnin menetelmät ja ohjelmat.

Menetelmä	Ohjelmat
Tekijän ja indeksin avainsanojen laskenta	Omat Python-kieliset ohjelmat ja VOSviewer
Termilouhinta N -grammeilla otsikosta ja abstraktista	Omat R-kieliset ohjelmat ja bibliometrix-kirjaston funktiot
Termilouhinta substantiivilausekkeilla otsikosta ja abstraktista (lemmatisointi)	Omat Python-kieliset ohjelmat ja VOSviewer

Tekijän ja indeksin avainsanojen lukumääriä lasketaan suoraan aineistosta. Otsikon ja abstraktin tekstejä käsitellään tekstin louhinnan menetelmillä. Tekijän ja indeksin avainsanojen laskenta on yksinkertaista ja yleisyys saadaan järjestämällä ne lukumäärän mukaan. Haasteena on erityisesti tekijöiden avainsanoissa samaa asiaa tarkoittavan termin monenlaiset kirjoitusasut. Lisäksi tekijä tai indeksi ei välttämättä laita kaikkia tutkimusaiheita avainsanoiksi, jolloin niiden tilastointi ei siinä tapauksessa onnistu tekijän ja indeksin avainsanoja laskemalla.

Termilouhinta otsikosta ja abstraktista antaa mahdollisuuden saada huomattavasti laajempi, kattavampi ja monipuolisempi joukko termejä yleisimpien tutkimusaiheiden tilastointiin. Haasteena N -grammien tapauksessa on valittava N eli termissä esiintyvien sanojen lukumäärä. Esimerkiksi bibliometrix-ohjelman graafisessa käyttöliittymässä olisi mahdollista valita N -arvoksi ainoastaan 1, 2 tai 3. Tutkimusaihetta kuvaava termi saattaa

kuitenkin olla pidempi kuin 3 sanaa ja tällöin termi ei tule kokonaisena näkyviin lyhyemmällä N -grammien laskennalla. Tätä vastoin termilouhinta VOSviewer-ohjelman substantiivilausekemenetelmällä ei rajoita termissä esiintyvien sanojen lukumäärää eli soveltuu siinä mielessä paremmin pidempien termien löytämiseen. Toisaalta substantiivilausekemenetelmä tekee tekstille substantiivilausekemuunnoksen ja termejä löydetään ainoastaan muunnettujen substantiivilausekkeiden joukosta. Haasteena on arvioida kattavuutta, että jääkö joitain tutkimuksen kannalta mielenkiintoisia tutkimusaiheita tämän muunnoksen myötä pois löydettyjen termien joukosta.

3.4 Yhteenveto

Tutkielman menetelmien ja aineiston esittelyn jälkeen siirrytään tutkielman tulosten esittelyyn.

4 Tulokset: julkaisupopulaatiot

Tutkielmassa vertailtiin 18 tietokantaa julkaisupopulaatioiden kartoittamiseksi hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla. Tietokannoissa suoritettiin sanahaut joko rajoituksetta käyttäen kaikkea julkaisussa esiintyvää tekstisisältöä tai rajaamalla sanahaku käyttämään vain yhtä tai useampaa seuraavista tietokentistä: julkaisun otsikko, abstrakti tai avainsanat. Hakutuloksesta merkittiin muistiin hakua vastaava julkaisujen kokonaismäärä sekä julkaisuvuodet vanhimmasta ja uusimmasta julkaisusta.

Tietokannoissa havaittiin ongelmia vanhojen julkaisuvuosien kanssa. Useissa tietokannoissa on merkitty vanhoille julkaisuvuosille virheellisesti julkaisuja, jotka eivät ylipäättäen liity sanahaun aiheeseen. Lisäksi vanhoille julkaisuvuosille on myös merkitty virheellisesti julkaisuja, joiden todellinen julkaisuajankohta on huomattavasti myöhäisempi. Näistä syistä tietokantojen vanhimman aiheeseen liittyvän julkaisun ja sen julkaisuvuoden varmistus täytyi tehdä erikseen manuaalisesti.

4.1 Hyperspektrikuvantamisen julkaisupopulaatio

Seuraava taulukko 15 esittelee tulokset hyperspektrikuvantamisen julkaisupopulaatiosta tutkielmaan valituista 18 julkaisutietokannasta, kun sanahaut tehtiin hakusanalla ”hyperspectral”.

Taulukko 15. Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen julkaisupopulaatio.

Tietokanta	Haku: kaikki kentät	Haku: rajatut kentät	Julkaisujen aikaväli
Google Scholar	711 000	113 000 ¹	(1984) - 2026
Bielefeld Academic Search Engine	102 507	69 663 ¹	1984 - 2026
Naver Academic	38 157	26 102 ¹	1976 - 2025
Internet Archive Scholar	51 775		1987 - 2025

OpenAlex	-	73 000 ²	1981 - 2025
Lens.org	115 164	76 812 ²	1984 - 2025
CORE	110 030	46 725 ¹	
Semantic Scholar	69 900	-	
Scinapse	65 539	-	
WorldCat	136 234	115 043 ¹	1984 - 2026
Scilit	67 616	-	1984 - 2026
OpenAIRE	72 238	-	
Scite	85 180	54 593 ²	
Dimensions - Publications	325 679	62 331 ²	1984 - 2026
Crossref	47 089	-	
Mendeley	66 598	-	
Scopus	267 766	66 618 ³	1984 - 2026
Web of Science Core Collection	38 476	-	1987 - 2026

¹ Otsikko. ²Otsikko ja abstrakti. ³Otsikko, abstrakti ja avainsanat.

Taulukon lukumäärien perusteella SCOPUS-tietokannasta otsikon, abstraktin ja avainsanojen mukaan löytyvä julkaisuotos (66 618 kpl) kattaa lukumäärällisesti hyvin julkaisupopulaation, kun julkaisupopulaatio arvioidaan kaikkien tietokantojen hakutulosten lukumäärien mukaan. Ainoastaan Google Scholar (113 000 kpl) ja WorldCat (115 043 kpl) tietokannoista löytyy otsikon mukaan merkittävästi enemmän julkaisuja. Verrattuna muihin tietokantoihin SCOPUS-tietokannan ajallinen kattavuus on hyvä. Verrattaessa usein käytettyä WOSCC-tietokantaa SCOPUS-aineistoon on nähtävissä seuraavassa taulukossa 16, että WOSCC-tietokannasta puuttuu kokonaan suuren määrän julkaisuja sisältäviä aikakauslehtiä.

Taulukko 16. Hyperspektrikuvantaminen: SCOPUS ja WOSCC eniten julkaisuja sisältävät aikakauslehdet.

Aikakauslehden nimi	SCOPUS ¹	WOSCC
Proc. of SPIE - The Intern. Society for Optical Engineering	6 996	0

Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)	3 570	0
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	2 987	3 042
Remote Sensing	2 770	2 972

¹Bibliometrix/biblioshiny-ohjelmalla laskettuna

Varhaisimmat julkaisut hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueella:

- 1976: R. B. Wattson ja muut: "Imaging spectrometer study of Jupiter and Saturn".
- 1984: W. C. Chiou: "Dynamic descriptors for contextual classification of remotely sensed hyperspectral image data analysis".

4.2 FPGA-tekniikan julkaisupopulaatio

Seuraava taulukko 17 esittelee tulokset FPGA-tekniikan julkaisupopulaatiosta tutkielmaan valituista 18 julkaisutietokannasta, kun sanahaut tehtiin hakusanalla "fpga".

Taulukko 17. FPGA-tekniikan tutkimusalueen julkaisupopulaatio.

Tietokanta	Haku: kaikki kentät	Haku: rajatut kentät	Julkaisujen aikaväli
Google Scholar	1 180 000	145 000 ¹	(1980) - 2026
Bielefeld Academic Search Engine ⁴	102 124	54 537 ¹	1990 - 2025
Naver Academic	46 421	21 330 ¹	1990 - 2025
Internet Archive Scholar	104 510		1990 - 2025
OpenAlex		137 200 ²	1980 - 2025
Lens.org	202 959	148 874 ²	1989 - 2025
CORE	150 938	50 008 ¹	1991 - 2025
Semantic Scholar	151 000		
Scinapse	95 575		
WorldCat	155 975	88 563 ¹	1990 - 2026
Scilit	102 741		1987 - 2025
OpenAIRE	103 112		

Scite	99 939	61 769 ²	
Dimensions - Publications	435 659	102 795 ²	1984 - 2026
Crossref	40 919		
Mendeley	103 530		
Scopus	233 889	109 713 ³	1980 - 2026
Web of Science Core Collection	26 864		1989 - 2026

¹ otsikko, ²otsikko ja abstrakti, ³otsikko, abstrakti ja avainsanat, ⁴valinnalla "no datasets"

Taulukon lukumäärien perusteella SCOPUS-tietokannasta otsikon, abstraktin ja avainsanojen mukaan löytyvä julkaisuotos (109 713 kpl) kattaisi lukumäärällisesti hyvin julkaisupopulaation, kun julkaisupopulaatio arvioidaan kaikkien tietokantojen hakutulosten lukumäärien mukaan. Ainoastaan Google Scholar (145 000 kpl), OpenAlex (137 200 kpl) ja Lens.org (148 874 kpl) tietokannoista löytyy otsikon mukaan merkittävästi enemmän julkaisuja. Verrattuna muihin tietokantoihin SCOPUS-tietokannan ajallinen kattavuus on hyvä. Verrattaessa usein käytettyä WOSCC-tietokantaa SCOPUS-aineistoon on nähtävissä seuraavassa taulukossa 18, että WOSCC-tietokannasta puuttuu kokonaan suuren määrän julkaisuja sisältäviä aikakauslehtiä.

Taulukko 18. FPGA-tekniikka: SCOPUS ja WOSCC eniten julkaisuja sisältävät aikakauslehdet.

Aikakauslehden nimi	SCOPUS ¹	WOSCC
Proc. of SPIE the Intern. Society for Optical Engineering	3 085	0
Lecture Notes in Computer Science incl. subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics	3 042	702
Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems	1 288	0
IEEE Access	984	904

¹Bibliometrix/biblioshiny-ohjelmalla laskettuna ²Erikseen lueteltu: CS 686 ja AI 16

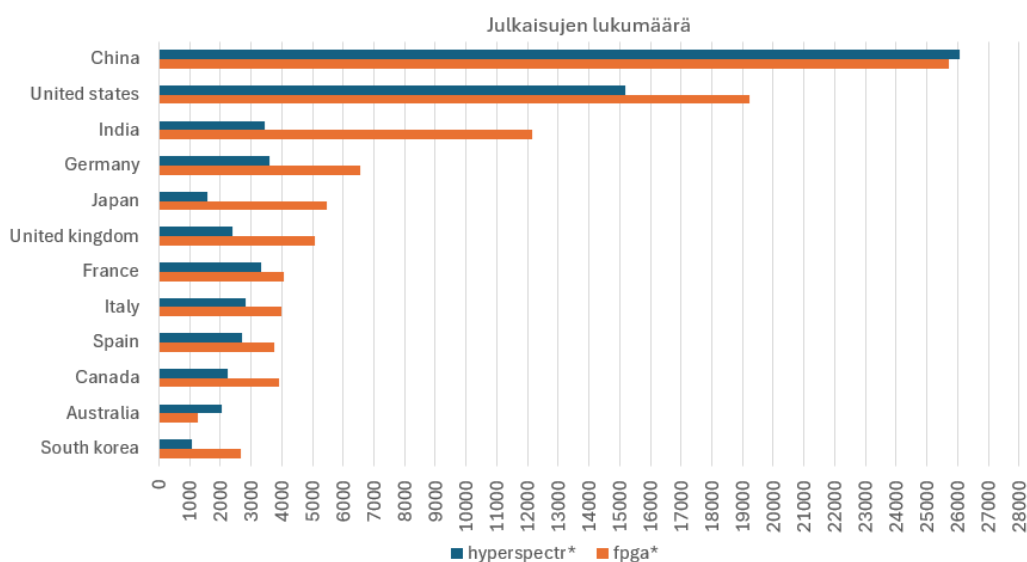
Varhaisimmat julkaisut FPGA-tekniikan tutkimusalueella:

- 1989: P. Dillien, "Electrically reconfigurable arrays-ERAs".

- 1989: W. Monteith ja muut, "ASIC approach to industrial inspection using non-structured light".

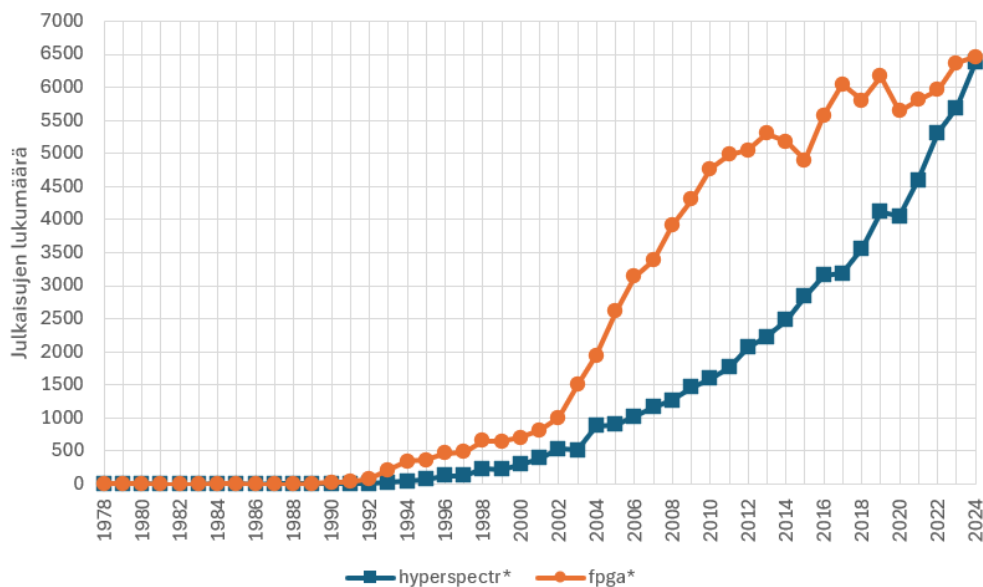
4.3 Molemmat julkaisupopulaatiot

Seuraava kuva 8 esittää hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden julkaisupopulaatioissa yleisimmin julkaisuihin liittyvät maat aikavälillä 1978 - 2024. Molemmista tutkimusalueista valittiin vertailukuvaan mukaan 10 yleisimmin julkaisuihin liittyvää maata ja valituista maista muodostui kuvassa näkyvä kahdentoista maan joukko.



Kuva 8. Yleisimmin julkaisuun liitetyt maat hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.

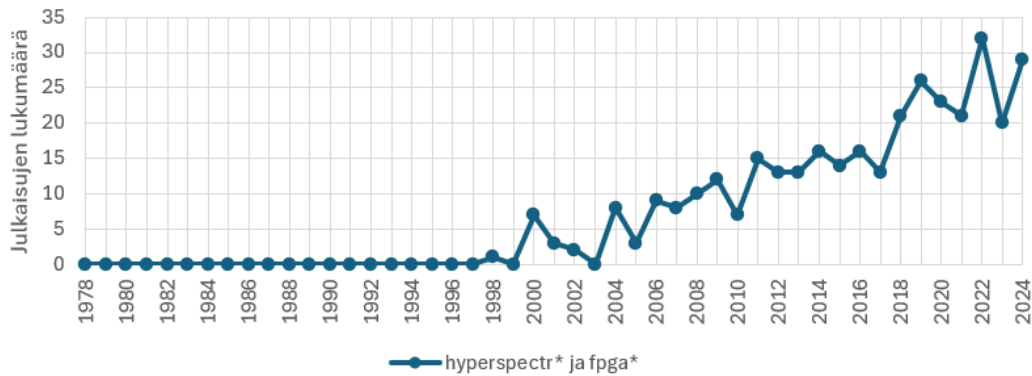
Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden julkaisupopulaatiot ovat historiallisesti molemmat olleet vahvan kasvun vaiheessa. Seuraava kuva 9 esittää julkaisupopulaatiot aikavälillä 1978 - 2024.



Kuva 9. Julkaisujen lukumäärät vuosittain hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.

Molempien tutkimusalueiden aktiivinen vaihe alkoi noin vuoden 1994 paikkeilla. Alkuvaiheessa FPGA-tekniikan vuosittaiset julkaisumäärät olivat moninkertaiset hyperspektrikuvantamiseen nähden, mutta viime vuosina julkaisumäärät ovat tasaantuneet molemmilla tutkimusalueilla hyvin samaan kokoluokkaan eli noin 5000 - 6000 julkaisua vuodessa.

Tutkimus näiden kahden tutkimusalueen rajapinnassa on ollut huomattavasti vähäisempää ja rajapintatutkimuksen populaatio sisältää tällä hetkellä vain 327 julkaisua. Seuraava kuva 10 esittää rajapintatutkimuksen julkaisupopulaation aikavälillä 1978 - 2024.



Kuva 10. Molemmat tutkimusalueet mainitsevien julkaisujen lukumäärä vuosittain hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueilla aikavälillä 1978 - 2024.

Varhaisimmat julkaisut hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden rajapinnassa:

- 1998: Figueiredo M.A. ja muut, "Implementation of a probabilistic neural network for multi-spectral image classification on an FPGA based custom computing machine".
- 2000: McElwain Thomas P. ja muut, "Detection and processing of hyperspectral imaging data with quantum-well devices".

Eniten viittauksia saaneet julkaisut hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden rajapinnassa:

- 220 siteerausta: Plaza A. ja muut: "High Performance Computing for Hyperspectral Remote Sensing", 2011.
- 189 siteerausta: Ram B.G. ja muut: "A systematic review of hyperspectral imaging in precision agriculture: Analysis of its current state and future prospects", 2024.
- 99 siteerausta: Lopez S. ja muut: "The promise of reconfigurable computing for hyperspectral imaging onboard systems: A review and trends", 2013

5 Tulokset: avainsanojen ja termien analyysi

SCOPUS-aineistoista laskettiin tekijän avainsanat, indeksin avainsanat ja kaikki avainsanat VOSviewer-ohjelmalla. Laskenta tuotti seuraavan taulukon 19 mukaiset lukumäärät.

Taulukko 19. Aineistojen avainsanojen laskennan tulos.

Aineiston ominaisuus	hyperspectr*	fpga*
Vain tekijän avainsanat	81 040	119 035
Indeksin avainsanat	116 067	179 551
Kaikki avainsanat ¹	157 428	237 255

¹Tekijän avainsanoista ja SCOPUS-tietokannassa indeksoinnin avainsanoista uniikit avainsanat.

SCOPUS-aineistojen abstraktien teksteille suoritettiin *N*-grammeihin perustuva termilouhinta ilman stemmingiä omilla R-kielisillä ohjelmilla ja bibliometrix-kirjaston funktioilla. Termilouhinta tuotti seuraavan taulukon 20 mukaiset lukumäärät.

Taulukko 20. Aineistojen *N*-grammien laskennan tulos.

Aineiston ominaisuus	hyperspectr*	fpga*
1-grammit	157 657	167 772
2-grammit	1 196 082	1 483 997
3-grammit	1 197 861	1 555 684
4-grammit	713 764	875 234

SCOPUS-aineistojen abstraktien ja otsikoiden teksteille suoritettiin VOSviewer-ohjelman substantiivilausekemenetelmään perustuva termilouhinta omilla Python-kielisillä ohjelmilla ja VOSviewer-ohjelmalla. Termilouhinta tuotti seuraavan taulukon 21 mukaiset lukumäärät.

Taulukko 21. Aineistojen substantiivilausekemenetelmällä termilouhittujen termien laskennan tulos.

Aineiston ominaisuus	hyperspectr*	fpga*
Termilouhinta otsikosta ja abstraktista	753 632	1 006 480

5.1 Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalue

5.1.1 Avainsanojen mukaan

Lkm	Indeksin avainsanat	Lkm	Tekijän avainsanat
21 041	spectroscopy	8 278	hyperspectral imaging
20 917	remote sensing	7 121	hyperspectral
19 618	hyperspectral imaging	4 234	remote sensing
15 941	hyperspectral	3 452	hyperspectral image
7 938	image classification	2 579	deep learning
6 710	classification (of information)	2 522	classification
5 078	image analysis	1 993	machine learning
4 369	deep learning	1 776	hyperspectral image classification
4 349	pixels	1 773	hyperspectral images
4 101	hyperspectral data	1 761	hyperspectral imagery
4 075	image processing	1 751	hyperspectral remote sensing
4 072	algorithm	1 247	hyperspectral data
3 951	image enhancement	1 067	feature extraction
3 950	spectral analysis	1 025	hyperspectral image (hsi)
3 909	infrared devices	886	anomaly detection
3 862	algorithms	841	hyperspectral image (hsi) classification
3 858	article	840	convolutional neural network
3 629	feature extraction	832	spectroscopy
3 595	reflection	832	target detection
3 419	principal component analysis	803	band selection

3 289	support vector machines	799	spectral unmixing
3 072	learning systems	708	dimensionality reduction
3 046	hyperspectral image classification	662	multispectral
2 827	machine learning	659	support vector machine
2 823	convolution	611	lidar
2 794	hyper-spectral images	609	principal component analysis
2 606	convolutional neural network	608	image processing
2 598	hyper-spectral imageries	607	hyperspectral unmixing
2 570	spectrum analysis	586	imaging spectroscopy
2 562	multispectral image	579	image classification
2 504	satellite imagery	577	feature selection
2 496	vegetation	551	data fusion
2 492	independent component analysis	534	transformer

5.1.2 Termilouhinta *N*-grammeilla

Lkm	1-gram kaikki esiintymät	Lkm	4-gram kaikki esiintymät
124 985	hyperspectral	1 970	support vector machine svm
93 385	spectral	1 863	principal component analysis pca
90 154	data	1 712	hyperspectral image hsi classification
49 672	classification	1 066	convolutional neural network cnn
49 400	method	994	informa uk limited trading
47 876	image	847	convolutional neural networks cnns
47 089	results	769	normalized difference vegetation index
46 884	model	725	hyperspectral remote sensing images
41 322	imaging	722	hyperspectral remote sensing data

40 901	images	692	photo-optical instrumentation engineers spie
38 574	information	689	competitive adaptive reweighted sampling
38 351	proposed	551	spectral angle mapper sam
37 886	based	536	difference vegetation index ndvi
34 989	methods	531	hyperspectral remote sensing image
34 594	spatial	527	adaptive reweighted sampling cars
31 253	accuracy	492	successive projections algorithm spa
30 409	analysis	466	nm nm nm nm
29 674	detection	464	unmanned aerial vehicle uav
28 812	hsi	427	hyperspectral remote sensing technology
28 085	study	374	airborne visibleinfrared imaging spectrometer
27 409	features	362	linear discriminant analysis lda
26 586	algorithm	324	support vector regression svr
26 017	sensing	299	support vector machines svm
24 902	performance	293	extreme learning machine elm
24 683	remote	285	unmanned aerial vehicles uavs
23 123	paper	282	real hyperspectral data sets
22 718	models	272	remote sensing image classification
22 382	feature	259	standard normal variate snv
21 863	nm	257	artificial neural network ann
20 860	reflectance	257	hyperspectral image classification hsic

Lkm	2-gram kaikki esiintymät	Lkm	3-gram kaikki esiintymät
23 061	remote sensing	5 660	hyperspectral remote sensing
19 060	hyperspectral imaging	3 726	hyperspectral image hsi

17 437	hyperspectral image	3 714	support vector machine
16 953	hyperspectral images	3 419	principal component analysis
15 673	hyperspectral data	3 161	hyperspectral image classification
8 965	experimental results	2 819	hyperspectral imaging hsi
6 700	spectral information	2 595	remote sensing data
6 446	classification accuracy	2 526	convolutional neural network
6 366	neural network	1 996	vector machine svm
6 011	spatial resolution	1 965	component analysis pca
5 786	hyperspectral remote	1 736	image hsi classification
5 619	deep learning	1 662	hyperspectral images hsis
5 489	feature extraction	1 661	convolutional neural networks
5 482	hyperspectral imagery	1 659	hyperspectral imaging system
5 358	support vector	1 626	remote sensing images
4 933	hsi classification	1 596	hyperspectral imaging technology
4 740	machine learning	1 314	remote sensing image
4 654	ieee na	1 271	experimental results demonstrate
4 566	spectral data	1 255	squares regression plsr
4 515	spectral bands	1 168	neural network cnn
4 498	image classification	1 128	random forest rf
4 388	principal component	1 074	remote sensing technology
4 328	component analysis	994	informa uk limited
4 296	convolutional neural	994	uk limited trading
4 263	spatial information	925	hyperspectral image data
4 181	spectral resolution	916	difference vegetation index
3 884	vector machine	907	spectral angle mapper
3 815	image hsi	897	hyperspectral data sets
3 751	spectral features	886	support vector machines
3 373	spectral reflectance	879	photo-optical instrumentation engineers

5.1.3 Termilouhinta substantiivimenetelmällä

Lkm	Binaarinen termin laskenta	Lkm	Termin kaikki esiintymät
19 556	paper	24 359	hyperspectral image
17 269	hyperspectral image	23 187	study
17 130	study	22 017	paper
12 919	data	18 830	model
11 717	model	17 850	data
9 828	image	15 832	hsi
9 808	hyperspectral imaging	14 721	algorithm
9 590	algorithm	14 227	image
9 225	hsi	13 826	hyperspectral imaging
8 529	classification	11 761	classification
8 465	experimental result	11 333	hyperspectral data
8 319	approach	10 614	approach
8 316	application	10 294	accuracy
8 276	hyperspectral data	9 960	application
7 969	accuracy	9 322	sample
7 797	performance	9 225	pixel
7 006	technique	9 065	performance
6 961	order	8 888	band
6 800	experiment	8 824	technique
6 452	state	8 567	experimental result
6 397	pixel	8 101	detection
6 305	use	7 982	order
5 996	sample	7 394	use
5 832	detection	7 362	experiment
5 737	analysis	6 804	state
5 636	time	6 761	feature
5 498	problem	6 716	analysis

5 419	band	6 633	system
5 242	work	6 570	time
5 122	field	6 340	problem

5.2 FPGA-tekniikan tutkimusalue

5.2.1 Avainsanojen mukaan

Lkm	Indeksin avainsanat	Lkm	Tekijän avainsanat
64 092	field programmable gate arrays (fpga)	33 455	fpga
14 305	integrated circuit design	2 239	field programmable gate array (fpga)
9 548	hardware	2 002	field-programmable gate array (fpga)
8 622	reconfigurable hardware	1 891	field programmable gate array
7 840	algorithms	1 585	vhdl
7 658	computer hardware	1 564	field programmable gate arrays
6 783	logic gates	1 157	fpgas
6 319	signal processing	1 064	image processing
6 313	field programmable gate arrays	1 055	fpga implementation
6 274	field programmables	945	hardware acceleration
6 236	programmable gate array	923	dsp
5 883	embedded systems	919	machine learning
5 717	fpga implementations	894	real-time
5 435	computer hardware description languages	857	deep learning
5 381	computer architecture	843	embedded systems
4 847	system-on-chip	838	hardware accelerator

4 721	hardware implementations	832	hardware implementation
4 453	cryptography	831	reconfigurable computing
4 302	program processors	809	asic
4 158	digital signal processing	807	cryptography
4 079	application specific integrated circuits	796	high-level synthesis
3 952	design	704	field-programmable gate array
3 945	image processing	697	hardware
3 739	energy efficiency	679	security
3 709	reconfigurable architectures	663	soc
3 648	real time systems	626	accelerator
3 608	field programmable gate array	606	embedded system
3 550	network architecture	604	aes
3 433	neural networks	598	gpu
3 256	computer circuits	582	vlsi
3 233	programmable logic controllers	576	neural network
3 190	memory architecture	565	reliability
3 028	performance	563	risc-v

5.2.2 Termilouhinta *N*-grammeilla

Lkm	1-gram kaikki esiintymät	Lkm	4-gram kaikki esiintymät
130 151	fpga	13 629	field programmable gate array
103 377	system	9 937	programmable gate array fpga
78 452	hardware	5 601	field programmable gate arrays
78 168	design	5 036	field-programmable gate array fpga
74 613	paper	3 239	programmable gate arrays fpgas
69 712	proposed	2 079	field-programmable gate arrays fpgas

64 176	data	1 565	fpga field programmable gate
62 025	based	1 345	programmable gate arrays fpga
56 015	performance	841	trans tech publications switzerland
55 538	ieee	754	convolutional neural networks cnns
53 282	implementation	713	digital signal processing dsp
50 256	results	688	convolutional neural network cnn
49 655	algorithm	676	gate array fpga based
49 171	power	650	fast fourier transform fft
48 783	architecture	638	hardware description language vhdl
45 851	processing	620	advanced encryption standard aes
39 960	time	610	hardware description language hdl
39 623	control	584	gate array fpga implementation
37 962	systems	576	digital signal processor dsp
36 958	implemented	493	gate array fpga technology
36 161	method	478	field-programmable gate array fpga-based
33 988	gate	465	world scientific publishing company
33 466	applications	458	orthogonal frequency division multi-plexing
31 388	digital	450	verilog hardware description language
31 266	fpgas	423	gate array fpga device
30 955	signal	417	gate array fpga platform
30 710	array	416	application specific integrated circuit
28 419	programmable	411	bit error rate ber
28 409	field	404	programmable gate array fpga-based
26 907	image	400	finite impulse response fir

Lkm	2-gram kaikki esiintymät	Lkm	3-gram kaikki esiintymät
------------	---------------------------------	------------	---------------------------------

22 029	gate array	19 660	field programmable gate
20 473	field programmable	15 285	gate array fpga
20 103	programmable gate	13 954	programmable gate array
15 537	array fpga	7 365	field-programmable gate array
12 077	experimental results	5 691	programmable gate arrays
11 605	power consumption	5 399	gate arrays fpgas
10 508	field-programmable gate	2 944	field-programmable gate arrays
8 922	gate arrays	2 503	hardware description language
7 343	signal processing	2 480	digital signal processing
7 204	neural network	1 856	springer-verlag berlin heidelberg
6 859	hardware implementation	1 705	gate arrays fpga
6 224	real time	1 653	low power consumption
5 992	fpga implementation	1 606	fpga field programmable
5 662	neural networks	1 410	convolutional neural networks
5 460	arrays fpgas	1 328	convolutional neural network
5 316	image processing	1 218	data acquisition system
4 591	proposed architecture	1 121	experimental results demonstrate
4 473	digital signal	1 078	fast fourier transform
4 451	ieee na	985	nature switzerland ag
4 391	data acquisition	975	trans tech publications
4 027	control system	966	sciencebusiness media llc
3 941	fpga based	959	digital signal processor
3 933	low power	954	nature singapore pte
3 521	hardware architecture	935	high-level synthesis hls
3 504	simulation results	906	gate array fpga-based
3 308	energy efficiency	884	pulse width modulation
3 150	fpga platform	857	design space exploration
3 106	hardware description	841	tech publications switzerland
3 092	fpga device	826	bit error rate

3 091	embedded systems	822	advanced encryption standard
-------	------------------	-----	------------------------------

5.2.3 Termilouhinta substantiivimenetelmällä

Lkm	Binaarinen termin laskenta	Lkm	Termin kaikki esiintymät
63 156	fpga	95 325	fpga
62 439	paper	71 534	paper
28 940	system	46 398	system
23 901	implementation	30 526	implementation
21 920	field programmable gate array	25 539	algorithm
18 929	performance	24 520	architecture
16 890	algorithm	23 118	performance
16 587	application	22 695	field programmable gate array
16 492	architecture	20 755	application
15 174	fpgas	20 546	fpgas
14 704	time	18 711	time
13 571	work	16 255	hardware
13 332	order	15 372	work
13 008	hardware	15 077	order
11 727	experimental result	13 976	approach
11 062	approach	13 874	data
10 366	data	12 021	number
9 715	number	11 926	experimental result
9 439	use	11 449	technique
8 993	technique	10 803	use
8 415	device	10 688	device
7 849	fpga implementation	9 765	chip
7 806	development	9 213	area
7 730	term	9 099	development
7 428	chip	9 049	fpga implementation

7 304	area	8 967	software
7 252	problem	8 877	model
7 246	software	8 636	term
7 204	speed	8 537	signal
7 052	addition	8 492	speed

5.3 Molemmilla tutkimusalueilla yleisimmät tutkimusaiheet

Seuraaviin taulukoihin 22 – 27 on kerätty edeltävien lukujen taulukoista sellaiset yhteiset tutkimusaiheet, jotka ovat molemmilla tutkimusalueilla yleisimpiä. Nämä molemmilla tutkimusalueilla yleisimmät tutkimusaiheet kuvaavat hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueen rajapintaa eli tutkimusalueiden päällekkäisyyttä.

Taulukko 22. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät avainsanat.

hyperspectr*	fpga*
image classification, image analysis, image processing, image enhancement	image processing
deep learning, machine learning, learning systems	deep learning, machine learning
algorithms	algorithms
convolutional neural network	neural network, neural networks

Taulukko 23. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 1-grammit.

hyperspectr*	fpga*
data	data
image, imaging, images	image
algorithm	algorithm

performance	performance
-------------	-------------

Taulukko 24. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 2-grammit.

hyperspectr*	fpga*
neural network, convolutional neural	neural network, neural networks
hyperspectral imaging, hyperspectral image, hyperspectral images, hyperspectral imagery, image classification, image hsi	image processing

Taulukko 25. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 3-grammit.

hyperspectr*	fpga*
convolutional neural network, convolutional neural networks, neural network cnn	convolutional neural network, convolutional neural networks

Taulukko 26. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät 4-grammit.

hyperspectr*	fpga*
convolutional neural network cnn, convolutional neural networks cnns	convolutional neural networks cnns, convolutional neural network cnn

Taulukko 27. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan aineistoissa molemmissa yleisimmin esiintyvät termit substantiivimenetelmällä.

hyperspectr*	fpga*
data	data
algorithm	algorithm
time	time

performance	performance
-------------	-------------

5.4 Tutkimusalueiden ympäristön kartoitus

Edeltävissä kappaleissa selvitettyjen yleisimpien avainsanojen ja termien perusteella haettiin hakusanoja kuvaamaan hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueisiin liittyviä muita julkaisujen lukumäärällä mitattuna merkittäviä tutkimusalueita. Seuraava taulukko 28 esittää näitä muita merkittäviä tutkimusalueita kuvaavat hakusanat ja niiden perusteella SCOPUS-tietokannasta selvitetty tutkimusalueen julkaisujen lukumäärät ja ensimmäisen tutkimusalueen julkaisun ajankohdan. Tutkimusalueet on esitetty ensimmäisen julkaisun mukaan aikajärjestyksessä ja julkaisujen määrän mukainen järjestysnumero on esitetty suluissa tutkimusaluetta kuvaavan hakusanan yhteydessä seitsemälle suurimmalle julkaisumäärälle.

Taulukko 28. Merkittävät muut tutkimusalueet aikajärjestyksessä.

Tutkimusaluetta kuvaava hakusana	Julkaisujen määrä	Ensimmäinen julkaisu
comput* (1.)	9 347 313	1812
satellit*	627 617	1837
logic*	725 952	1843
algorithm* (4.)	4 587 481	1844
embedded*	754 529	1851
imag* (3.)	6 038 123	1859
neural*	1 772 705	1865
spectr* (2.)	6 771 268	1867
classif* (6.)	3 128 245	1868
learn* (5.)	3 821 328	1870
infra*red* (7.)	1 331 047	1870
hardware*	570 857	1908
"energy efficien*"	384 053	1909

Tutkimusaluetta kuvaava hakusana	Julkaisujen määrä	Ensimmäinen julkaisu
"remote sens*"	378 049	1912
"integr* circuit*"	433 968	1929
reconfigur*	192 231	1952
"signal* process*"	581 465	1956

Muiden merkittävien tutkimusalueiden kartoituksen jälkeen selvitettiin kummankin tutkimusalueen hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueen osalta tutkimusalueen päällekkäisyys kunkin muun merkittävän tutkimusalueen kanssa. Seuraavat taulukot 29 ja 30 esittävät tulokset tutkimusalueiden päällekkäisyyden osalta. Tutkimusalueiden päällekkäisyydet on esitetty taulukoissa ensimmäisen julkaisun mukaan aikajärjestyksessä ja julkaisujen määrän mukainen järjestysnumero on esitetty suluissa päällekkäisyyttä kuvaavan hakusanan yhteydessä viidelle suurimmalle julkaisumäärälle.

Taulukko 29. Merkittävien muiden tutkimusalueiden päällekkäisyys hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen kanssa.

Tutkimusalueiden päällekkäisyys	Julkaisujen määrä	Ensimmäinen julkaisu
spectr* AND hyperspectr* (1.)	55 273	1980
imag* AND hyperspectr* (2.)	54 888	1984
"remote sens*" AND hyperspectr* (3.)	25 358	1984
classif* AND hyperspectr* (5.)	21 323	1984
learn* AND hyperspectr*	15 572	1985
infra*red* AND hyperspectr*	13 168	1989
satellit* AND hyperspectr*	8 365	1989
algorithm* AND hyperspectr* (4.)	21 919	1991
comput* AND hyperspectr*	11 739	1991
neural* AND hyperspectr*	8 862	1992
hardware* AND hyperspectr*	1 101	1992
"signal* process*" AND hyperspectr*	1 788	1993

Taulukko 30. Merkittävien muiden tutkimusalueiden päällekkäisyys FPGA-tekniikan tutkimusalueen kanssa.

Tutkimusalueiden päällekkäisyys	Julkaisujen määrä	Ensimmäinen julkaisu
logic* AND fpga* (4.)	24 475	1978
hardware* AND fpga* (2.)	55 211	1979
"integr* circuit*" AND fpga* (5.)	23 950	1979
comput* AND fpga* (1.)	56 815	1985
imag* AND fpga*	19 262	1989
algorithm* AND fpga* (3.)	38 306	1990
reconfigur* AND fpga*	19 268	1990
learn* AND fpga*	7 808	1990
"signal* process*" AND fpga*	14 310	1991
satellit* AND fpga*	2 386	1991
embedded* AND fpga*	14 715	1992
neural* AND fpga*	9 793	1992
spectr* AND fpga*	5 104	1993
"remote sens*" AND fpga*	865	1996
"energy efficien*" AND fpga*	4 757	1998

Yhteenveto viidestä tärkeimmästä päällekkäisestä muusta tutkimusalueesta kummankin tutkimusalueen osalta esitetään seuraavassa taulukossa 31.

Taulukko 31. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden kannalta viisi tärkeintä päällekkäistä muuta tutkimusaluetta.

Tutkimusalue	Viisi tärkeintä päällekkäistä muuta tutkimusaluetta
hyperspectr*	spectr*, imag*, "remote sens*", algorithm* ja classif*
fpga*	comput*, hardware*, algorithm*, logic* ja "integr* circuit"

Seuraava luettelo esittää vielä julkaisujen lukumäärän mukaan järjestettynä viisi suurinta tutkimusaluetta näistä edellisen taulukon 31 esittämästä kymmenestä päällekkäisestä muusta tutkimusalueesta:

- comput* (9 347 313 julkaisua)
- spectr* (6 771 268 julkaisua)
- imag* (6 038 123 julkaisua)
- algorithm* (4 587 481 julkaisua)
- classif* (3 128 245 julkaisua)

Tämän luettelon päällekkäisiä tutkimusalueita voidaan pitää suuruudeltaan viitenä merkittävimpinä muina tutkimusalueina, jotka liittyvät näihin kahteen tutkimusalueeseen.

6 Tulokset: viittausten analyysi

SCOPUS-aineistosta laskettiin tutkimusalueiden julkaisujen lukumäärät ryhmiteltynä niiden saamien viittausten vähimmäismäärän mukaan. Laskennan tulos esitetään seuraavassa taulukossa 32 ensinnä julkaisujen lukumääränä sekä sen jälkeen suluisa prosenttiosuutena tutkimusalueen julkaisupopulaatiosta.

Taulukko 32. Julkaisujen lukumäärä ja prosenttiosuus tutkimusalueen julkaisupopulaatiosta niiden saamien viittausten vähimmäismäärän mukaan ryhmiteltynä.

Julkaisun saamien viittausten vähimmäismäärä	hyperspectr*	fpga*
Viitattu vähintään 300 kertaa	512 (0,8 %)	108 (0,1 %)
Viitattu vähintään 100 kertaa	2 896 (4,4 %)	1 068 (1,0 %)
Viitattu vähintään 50 kertaa	6 999 (10,7 %)	3 460 (3,1 %)
Viitattu vähintään 10 kertaa	26 151 (39,8 %)	25 559 (22,9 %)
Viitattu vähintään 1 kerran	54 906 (83,6 %)	85 865 (76,9 %)

Tutkimusalueiden välillä on merkittävää eroa dokumenttien saamien viittausten lukumäärissä. Erityisesti vähintään 50 kertaa tai useammin viitattuja dokumentteja on hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueella prosentuaalisesti yli kolminkertainen määrä (10,7 %) FPGA-tekniikan tutkimusalueen vastaavaan arvoon nähden (3,1%). Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueen julkaisuja voidaan pitää tällä mittarilla tarkasteltuna tiukemmin kiinnitettynä viittausten kautta muihin tieteellisiin julkaisuihin kuin FPGA-tekniikan tutkimusalueen julkaisuja. Yksi mahdollinen selittävä tekijä on FPGA-tekniikan julkaisupopulaatiossa konferenssijulkaisujen huomattavasti suurempi osuus eli 65,0 % verrattuna konferenssijulkaisujen osuuteen hyperspektrikuvantamisen julkaisupopulaatiossa 35,9 % (ks. taulukko 12).

6.1 Eniten viittauksia saaneet julkaisut

SCOPUS-aineistosta haettiin eniten viittauksia saaneet julkaisut molemmille tutkimusalueille eli hyperspektrikuvantamiselle ja FPGA-tekniikalle ja nämä on esitetty seuraavissa taulukoissa 33 ja 34.

Taulukko 33. Hyperspektrikuvantamisen tutkimusalueella eniten viittauksia saaneet julkaisut

Siteer. lkm	Julkaisu
4 135	Melgani F. ja muut: Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines (2004)
2 843	Chen Y. ja muut: Deep Feature Extraction and Classification of Hyperspectral Images Based on Convolutional Neural Networks (2016)
2 625	Bioucas-Dias J.M. ja muut: Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches (2012)
2 595	Chen Y. ja muut: Deep learning-based classification of hyperspectral data (2014)
2 530	Nascimento J. M. P. ja muut: Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data (2005)
2 478	Keshava N. ja muut: Spectral unmixing (2002)
2 384	Haboudane D. ja muut: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture (2004)

Taulukko 34. FPGA-tekniikan tutkimusalueella eniten viittauksia saaneet julkaisut

Siteer. lkm	Julkaisu
6 414	Alzubaidi L. ja muut: Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions (2021)

3 356	Cui T. J. ja muut: Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials (2014)
1 892	Zhang C. ja muut: Optimizing FPGA-based accelerator design for deep convolutional neural networks (2015)
1 673	Reza A. M.: Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement (2004)
1 655	Vasimuddin V. ja muut: Efficient architecture-aware acceleration of BWA-MEM for multicore systems (2019)
1 490	Gassend B. ja muut: Silicon physical random functions (2002)
1 136	Chen T. ja muut: TVM: An automated end-to-end optimizing compiler for deep learning (2007)

6.2 TOP100 viitattujen julkaisujen yleisimmät lähteet

SCOPUS-aineistosta haettiin molemmille tutkimusalueille eli hyperspektrikuvantamiselle ja FPGA-tekniikalle 100 kpl eniten viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden joukosta yleisimmin esiintyvät lähteet ja nämä on esitetty seuraavissa taulukoissa 35 ja 36.

Taulukko 35. Hyperspektrikuvantamisen TOP100 viitattujen julkaisujen useiten esiintyvät lähteet.

Lkm TOP100 lähteissä	Siteer. lkm	Julkaisu
20	4 135	Melgani F. ja muut: Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines (2004)
16	2 595	Chen Y. ja muut: Deep learning-based classification of hyperspectral data (2014)
14	2 637	Hughes G.: On the Mean Accuracy of Statistical Pattern Recognizers (1968)
13	1 512	Harsanyi J.C.: Hyperspectral Image Classification and Dimensionality Reduction: An Orthogonal Subspace Projection Approach (1994)
13	1 092	Fauvel M. ja muut: Spectral and spatial classification of hyperspectral data using SVMs and morphological profiles (2008)
12	91 040	Krizhevsky A. ja muut: ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012)
12	2 850	Chen Y. ja muut: Deep Feature Extraction and Classification of Hyperspectral Images Based on Convolutional Neural Networks (2016)
11	1 388	Benediktsson J. A. ja muut: Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles (2005)
10	1 062	Camps-Valls G.: Composite kernels for hyperspectral image classification (2006)

Taulukko 36. FPGA-tekniikan TOP100 viitattujen julkaisujen useiten esiintyvät lähteet.

Lkm TOP100 lähteissä	Siteer. lkm	Julkaisu
16	91 040	Krizhevsky A. ja muut: ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012)
16	1 900	Zhang C. ja muut: Optimizing FPGA-based accelerator design for deep convolutional neural networks (2015)
11	50 822	Lecun Y.: Gradient-based learning applied to document recognition (1998)
11	322	Farabet C. ja muut: CNP: An FPGA-based processor for Convolutional Networks (2009)
11	343	Chakradhar S. ja muut: A dynamically configurable coprocessor for convolutional neural networks (2010)
10	503	Suda N. ja muut: Throughput-optimized openCL-based FPGA accelerator for large-scale convolutional neural networks (2016)
10	1 125	Qiu J. ja muut: Going deeper with embedded FPGA platform for convolutional neural network (2016)
9	1 443	Chen T. ja muut: DianNao: A small-footprint high-throughput accelerator for ubiquitous machine-learning (2014)
9	899	Putnam A. ja muut: A reconfigurable fabric for accelerating large-scale datacenter services (2014)

6.3 TOP100 viitattujen julkaisujen eniten viittauksia saaneet lähteet

SCOPUS-aineiston tutkimusalueen dokumentit järjestettiin dokumentin saamein viittausten lukumäärän mukaan laskevaan järjestykseen. Tämän järjestyksen perusteella haettiin tutkimusalueen TOP100 viitattujen dokumenttien kaikki SCOPUS-tietokannasta saatavilla olevat lähdedokumentit (references). Tällä tavoin saatua lähdedokumenttien joukko on nimetty TOP100REF.

Tämän TOP100 viittauksia saaneiden dokumenttien lähdedokumenttien joukko TOP100REF järjestettiin myös lähdedokumentin itse saamien viittausten lukumäärän mukaan laskevaan järjestykseen. Seuraava taulukko 37 esittää samassa taulukossa molempien tutkimusalueiden eli hyperspektrikuvantamisen (H1...H17 tunnisteet) sekä FPGA-tekniikan (F1...F15 tunnisteet) tutkimusalueiden TOP100REF joukosta eniten viitatut lähdedokumentit.

Taulukko 37. Hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden TOP100REF joukoista koottu yhdistelmätaulukko eli 100 eniten viittauksia saaneiden julkaisujen lähteiden joukosta eniten viitatut dokumentit.

H ja/tai F	Viitt. lkm	Lähdejulkaisu
H1 ja F1	209 616	He K. ja muut: Deep residual learning for image recognition (2016)
H2	112 758	Breiman L.: Random forests (2001)
H3 ja F2	91 040	Krizhevsky A. ja muut: ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012)
H4 ja F3	90 315	Hochreiter S. ja muut: Long Short-Term Memory (1997)
H5 ja F4	82 307	Ronneberger O. ja muut: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation (2015)
H6	78 696	Pedregosa F. ja muut: Scikit-learn: Machine learning in Python (2011)
H7 ja F5	76 389	Zadeh L.A.: Fuzzy sets (1965)
H8 ja F6	74 354	Lecun Y. ja muut: Deep learning (2015)
H9	65 808	Kennedy J. ja muut: Particle swarm optimization (1995)
H10 ja F7	61 090	Deng J. ja muut: ImageNet: A Large-Scale Hierarchical Image Database (2009)
F8	56 109	Kingma D.P.: Adam: A method for stochastic optimization (2015)
H11	54 561	Goodfellow I.J. ja muut: Generative adversarial nets (2014)

H12 ja F9	52 612	Lowe D.G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints (2004)
H13	52 051	Wang Z. ja muut: Image quality assessment: From error visibility to structural similarity (2004)
H14	51 006	Cortes C. ja muut: Support-Vector Networks (1995)
H15 ja F10	50 822	Lecun Y.: Gradient-based learning applied to document recognition (1998)
F11	46 960	Redmon J. ja muut: You only look once: Unified, real-time object detection (2016)
F12	45 554	Chen T. ja muut: XGBoost: A scalable tree boosting system (2016)
H16 ja F13	43 894	Szegedy C. ja muut: Going deeper with convolutions (2015)
H17	43 636	Akaike H.: A New Look at the Statistical Model Identification (1974)
F14	36 640	Srivastava N. ja muut: Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting (2014)
F15	36 577	Kirkpatrick S. ja muut: Optimization by simulated annealing (1983)

Painottamalla hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan julkaisujen joukosta TOP100 eniten viittauksia saaneita julkaisuja ja näiden TOP100 viitattujen julkaisujen lähdedokumenttien joukossa eniten viittauksia saaneita lähdedokumentteja paljastuu huomattava päällekkäisyys näiden kahden tutkimusalueen lähdedokumenttien välillä. Edellä esitetystä taulukosta 10 lähdedokumenttia 22 lähdedokumentin joukosta esiintyy molempien tutkimusalueiden lähdedokumenttien joukossa (45,5 %). Viittauksien lukumääriin perustuen nämä vaikuttaisivat olevan yleisesti ottaen usein käytettyjä tiedonlähteitä ja ne vaikuttaisivat olevan myös usein käytössä näiden kahden tutkimusalueen usein viitatuissa julkaisuissa.

7 Johtopäätökset

Tutkielma on tuottanut bibliometrisen analyysin hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueista niiden koko elinkaaren ajalta. Tämä antaa kvantitatiivisen pohjan ensinnäkin arvioida saatavilla olevaa tutkimusta sekä toiseksi havaita mahdollisesti lupaavia, mutta vähäiselle tutkimukselle jääneitä aiheita.

7.1 Suositukset

Avainsanat, N-grammit ja substantiivimenetelmä soveltuvat tutkimusaiheiden selvittämiseen ja esiintymislukumäärien laskentaan. Ne soveltuvat myös muiden tärkeiden tutkimusalueiden kartoittamiseen ja tutkimusalueiden päällekkäisyyden kartoittamiseen. Viittausten analyysi soveltuu keskeisien julkaisujen kartoittamiseen ja myös tutkimusalueiden tiedonlähteiden päällekkäisyyden kartoittamiseen.

7.2 Tutkimuksen rajoitukset

Tutkimusaineisto rajoittuu SCOPUS-tietokannan sisältöön ja käyttämällä lisäksi muita tietokantoja tutkielman kattavuus olisi laajempi. Tässä tutkimuksessa tutkimusaineisto on rajattu julkaisujen otsikoissa ja abstrakteissa esiintyviin sanoihin ja käyttämällä myös julkaisujen sisältötekstiä löydökset voisivat muuttua. Tietokannat sisältävät pääosin englanninkielisiä julkaisuja ja muilla kielillä kirjoitetut julkaisut eivät välttämättä tule niiden kautta esiin, kartoittamalla ja käyttämällä myös laajemmin muunkielisiä julkaisuja löydökset voisivat muuttua.

7.3 Jatkotutkimuksen mahdollisuudet

Jatkotutkimuksessa ensinnäkin käyttämällä useampaa tietokantaa julkaisujen hakuun voisi saavuttaa vielä paremman kattavuuden. Toiseksi julkaisujen sisältötekstin käyttö voisi antaa enemmän ja tarkempaa tietoa. Tutkielman tulokset

hyperspektrikuvantamisen ja FPGA-tekniikan tutkimusalueiden yleisimpien tutkimusaiheiden osalta antavat lukuisia hyviä aiheita jatkotutkimukselle.

8 Lähteet

- Abdelfattah, M. S., & Betz, V. (2013). The power of communication: Energy-efficient NOCS for FPGAs. *2013 23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/FPL.2013.6645496>
- ACM Computing Classification System. (2012). Association for Computing Machinery. <https://dl.acm.org/ccs>
- Adams, C. W., Backus, J. W., Carr, J. W., Hopper, G. M., Osborn, R. F., Patterson, G. W., Svigals, J., & Wegstein, J. (1954). *Report to the Association for Computing Machinery. First Glossary of Programming Terminology*. https://archive.computerhistory.org/resources/text/Knuth_Don_X4100/PDF_index/k-8-pdf/k-8-u2741-2-ACM-Glossary.pdf
- Ahmed, E., & Rose, J. (2000). The effect of LUT and cluster size on deep-submicron FPGA performance and density. *Proceedings of the 2000 ACM/SIGDA eighth international symposium on Field programmable gate arrays*, 3–12. <https://doi.org/10.1145/329166.329171>
- Anderson, J. H., Najm, F. N., & Tuan, T. (2004). Active leakage power optimization for FPGAs. *Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 33–41. <https://doi.org/10.1145/968280.968287>
- Ando, K., Ueyoshi, K., Oba, Y., Hirose, K., Uematsu, R., Kudo, T., Ikebe, M., Asai, T., Takamaeda-Yamazaki, S., & Motomura, M. (2018). Dither NN: An Accurate Neural Network with Dithering for Low Bit-Precision Hardware. *2018 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)*, 6–13. <https://doi.org/10.1109/FPT.2018.00013>
- Andraka, R. (1998). A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers. *Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays - FPGA '98*, 191–200. <https://doi.org/10.1145/275107.275139>
- Ansaloni, G., Scarabottolo, I., & Pozzi, L. (2020). Judiciously Spreading Approximation Among Arithmetic Components with Top-Down Inexact Hardware Design. Teoksessa F. Rincón, J. Barba, H. K. H. So, P. Diniz, & J. Caba (Toim.), *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2020. Lecture Notes in*

- Computer Science* (Vsk. 12083, ss. 14–29). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-44534-8_2
- Asano, S., Maruyama, T., & Yamaguchi, Y. (2009). Performance comparison of FPGA, GPU and CPU in image processing. *2009 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 126–131. <https://doi.org/10.1109/FPL.2009.5272532>
- Athanas, P. M., & Silverman, H. F. (1993). Processor reconfiguration through instruction-set metamorphosis. *Computer*, 26(3), 11–18. <https://doi.org/10.1109/2.204677>
- Azizi, N., Kuon, I., Egier, A., Darabiha, A., & Chow, P. (2004). Reconfigurable Molecular Dynamics Simulator. *12th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 197–206. <https://doi.org/10.1109/FCCM.2004.48>
- Babb, J., Rinard, M., Moritz, C. A., Lee, W., Frank, M., Barua, R., & Amarasinghe, S. (1999). Parallelizing applications into silicon. *Seventh Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (Cat. No.PR00375)*, 70–80. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1999.803669>
- Babb, J., Tessier, R., & Agarwal, A. (1993). Virtual wires: overcoming pin limitations in FPGA-based logic emulators. *[1993] Proceedings IEEE Workshop on FPGAs for Custom Computing Machines*, 142–151. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1993.279469>
- Baldwin, B., Byrne, A., Lu, L., Hamilton, M., Hanley, N., O’Neill, M., & Marnane, W. P. (2010). FPGA Implementations of the Round Two SHA-3 Candidates. *2010 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 400–407. <https://doi.org/10.1109/FPL.2010.84>
- Banerjee, P., Shenoy, N., Choudhary, A., Hauck, S., Bachmann, C., Haldar, M., Joisha, P., Jones, A., Kanhare, A., Nayak, A., Periyacheri, S., Walkden, M., & Zaretsky, D. (2000). A MATLAB compiler for distributed, heterogeneous, reconfigurable computing systems. *Proceedings 2000 IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (Cat. No.PR00871)*, 39–48. <https://doi.org/10.1109/FPGA.2000.903391>
- Betz, V., & Rose, J. (1997). VPR: a new packing, placement and routing tool for FPGA research. Teoksessa *Field-Programmable Logic and Applications. FPL 1997. Lecture*

- Notes in Computer Science* (Vsk. 1304, ss. 213–222). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/3-540-63465-7_226
- Betz, V., & Rose, J. (1999). FPGA routing architecture: segmentation and buffering to optimize speed and density. *Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 59–68.
<https://doi.org/10.1145/296399.296428>
- Betz, V., & Rose, J. (2000). Automatic generation of FPGA routing architectures from high-level descriptions. *Proceedings of the 2000 ACM/SIGDA eighth international symposium on Field programmable gate arrays*, 175–184.
<https://doi.org/10.1145/329166.329203>
- Birk, S., Steffan, J. G., & Anderson, J. H. (2010). Parallelizing FPGA placement using Transactional Memory. *2010 International Conference on Field-Programmable Technology*, 61–69. <https://doi.org/10.1109/FPT.2010.5681538>
- Bispo, J., Sourdis, I., Cardoso, J. M. P., & Vassiliadis, S. (2007). Synthesis of Regular Expressions Targeting FPGAs: Current Status and Open Issues. *Teoksessa Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2007. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4419, ss. 179–190). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-71431-6_17
- Boland, D., & Constantinides, G. A. (2010). Optimising Memory Bandwidth Use for Matrix-Vector Multiplication in Iterative Methods. *Teoksessa Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2010. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 5992, ss. 169–181). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12133-3_17
- Bolotski, M., Dehon, A., & Knight, T. F. (1994, helmikuuta 13). Unifying FPGAs and SIMD Arrays. *FPGA 94 - 2nd International ACM/SIGDA Workshop on Field-Programmable Gate Arrays*. http://www.seas.upenn.edu/~andre/pdf/dpga_fpga1994.pdf
- Bouwens, F., Berekovic, M., Kanstein, A., & Gaydadjiev, G. (2007). Architectural Exploration of the ADRES Coarse-Grained Reconfigurable Array. *Teoksessa Reconfigurable*

- Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2007. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4419, ss. 1–13). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71431-6_1
- Brebner, G. (1996). A virtual hardware operating system for the Xilinx XC6200. Teoksessa *Field-Programmable Logic Smart Applications, New Paradigms and Compilers. FPL 1996. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 1142, ss. 327–336). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-61730-2_35
- Butts, M., Jones, A. M., & Wasson, P. (2007). A Structural Object Programming Model, Architecture, Chip and Tools for Reconfigurable Computing. *15th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM 2007)*, 55–64. <https://doi.org/10.1109/FCCM.2007.7>
- Buyukkurt, B., Guo, Z., & Najjar, W. A. (2006). Impact of Loop Unrolling on Area, Throughput and Clock Frequency in ROCCC: C to VHDL Compiler for FPGAs. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures and Applications. ARC 2006. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 3985, ss. 401–412). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11802839_48
- Cadambi, S., Weener, J., Goldstein, S. C., Schmit, H., & Thomas, D. E. (1998). Managing pipeline-reconfigurable FPGAs. *Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays - FPGA '98*, 55–64. <https://doi.org/10.1145/275107.275120>
- Cardoso, J. M. P., & Najjar, W. (2025). First Twenty Years of the International Symposium on Applied Reconfigurable Computing (ARC): A Selection of Papers. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2025. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 15594, ss. 3–12). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87995-1_1
- Carter, W. S., Duong, K., Freeman, R. H., Hsieh, H., Ja, J., Mahoney, J. E., Ngo, L. T., & Sze, S. L. (1986). A User Programmable Reconfigurable Logic Array. *Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, 233–235.

- Caspi, E., Chu, M., Huang, R., Yeh, J., Markovskiy, Y., Dehon, A., & Wawrzynek, J. (2000). *Stream Computations Organized for Reconfigurable Execution (SCORE): Introduction and Tutorial Version 1.0*.
- Caspi, E., Chu, M., Huang, R., Yeh, J., Wawrzynek, J., & DeHon, A. (2000). Stream Computations Organized for Reconfigurable Execution (SCORE). Teoksessa R. W. Hartenstein & H. Grünbacher (Toim.), *Field-Programmable Logic and Applications: The Roadmap to Reconfigurable Computing. FPL 2000. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 1896, ss. 605–614). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-44614-1_65
- Chan, L. C., Malik, G., & Kapre, N. (2019). Partitioning FPGA-Optimized Systolic Arrays for Fun and Profit. *2019 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)*, 2019-December, 144–152. <https://doi.org/10.1109/ICFPT47387.2019.00025>
- Cheah, H. Y., Fahmy, S. A., & Maskell, D. L. (2012). iDEA: A DSP block based FPGA soft processor. *2012 International Conference on Field-Programmable Technology*, 151–158. <https://doi.org/10.1109/FPT.2012.6412128>
- Chen, L., & Mitra, T. (2012). Graph minor approach for application mapping on CGRAs. *2012 International Conference on Field-Programmable Technology*, 285–292. <https://doi.org/10.1109/FPT.2012.6412149>
- Cheng, S., Huang, Q., & Wawrzynek, J. (2017). Synthesis of program binaries into FPGA accelerators with runtime dependence validation. *2017 International Conference on Field Programmable Technology (ICFPT)*, 96–103. <https://doi.org/10.1109/FPT.2017.8280126>
- Chin, S. Y. L., & Wilton, S. J. E. (2007). Memory Footprint Reduction for FPGA Routing Algorithms. *2007 International Conference on Field-Programmable Technology*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/FPT.2007.4439225>
- Chow, C. T., Tsui, L. S. M., Leong, P. H. W., Luk, W., & Wilton, S. J. E. (2005). Dynamic voltage scaling for commercial FPGAs. *Proceedings. 2005 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology, 2005.*, 173–180. <https://doi.org/10.1109/FPT.2005.1568543>

- Claus, C., Ahmed, R., Altenried, F., & Stechele, W. (2010). Towards Rapid Dynamic Partial Reconfiguration in Video-Based Driver Assistance Systems. *Teoksessa Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2010. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 5992, ss. 55–67). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12133-3_8
- Comer, D. E., Gries, D., Mulder, M. C., Tucker, A., Turner, A. J., & Young, P. R. (1989). Computing as a discipline. *Communications of the ACM*, 32(1), 9–23. <https://doi.org/10.1145/63238.63239>
- Cong, J., & Ding, Y. (1994). FlowMap: an optimal technology mapping algorithm for delay optimization in lookup-table based FPGA designs. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1109/43.273754>
- Cong, J., Fan, Y., Han, G., & Zhang, Z. (2004). Application-specific instruction generation for configurable processor architectures. *Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 183–189. <https://doi.org/10.1145/968280.968307>
- Cong, J., & Hwang, Y.-Y. (1995). Simultaneous Depth and Area Minimization in LUT-based FPGA Mapping. *Third International ACM Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, 68–74. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1995.241947>
- Cong, J., Wu, C., & Ding, Y. (1999). Cut ranking and pruning: enabling a general and efficient FPGA mapping solution. *Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 29–35. <https://doi.org/10.1145/296399.296425>
- Cong, J., & Zhang, Z. (2006). An efficient and versatile scheduling algorithm based on SDC formulation. *Proceedings of the 43rd annual conference on Design automation - DAC '06*, 433. <https://doi.org/10.1145/1146909.1147025>
- Culbertson, W. B., Amerson, R., Carter, R. J., Kuekes, P., & Snider, G. (1997). Defect tolerance on the Teramac custom computer. *Proceedings. The 5th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines Cat. No.97TB100186*), 116–123. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1997.624611>

- De Dinechin, F., & Pasca, B. (2011). Designing Custom Arithmetic Data Paths with FloPoCo. *IEEE Design & Test of Computers*, 28(4), 18–27. <https://doi.org/10.1109/MDT.2011.44>
- DeHon, A. (1996). DPGA utilization and application. *Proceedings of the 1996 ACM fourth international symposium on Field-programmable gate arrays - FPGA '96*, 115–121. <https://doi.org/10.1145/228370.228387>
- DeHon, A. (1999). Balancing interconnect and computation in a reconfigurable computing array (or, why you don't really want 100% LUT utilization). *Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 69–78. <https://doi.org/10.1145/296399.296431>
- DeHon, A. (2000). The density advantage of configurable computing. *Computer*, 33(4), 41–49. <https://doi.org/10.1109/2.839320>
- DeHon, A. (2018). Recognized as the Best: The ACM/SIGDA TCFPGA Hall of Fame for FPGAs and Reconfigurable Computing. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 10(2), 30–35. <https://doi.org/10.1109/MSSC.2018.2822861>
- DeHon, A., & Wilson, M. J. (2004). Nanowire-based sublithographic programmable logic arrays. *Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 123–132. <https://doi.org/10.1145/968280.968299>
- Denning, P. J., & Tedre, M. (2019). *Computational Thinking*. MIT Press. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=5755781>
- Denning, P. J., & Tichy, W. F. (1990). Highly Parallel Computation. *Science*, 250(4985), 1217–1222. <http://www.jstor.org/stable/2878643>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Drimer, S. (2007). Authentication of FPGA Bitstreams: Why and How. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2007. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4419, ss. 73–84). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71431-6_7

- Duhem, F., Muller, F., & Lorenzini, P. (2012). Reconfiguration time overhead on field programmable gate arrays: reduction and cost model. *IET Computers & Digital Techniques*, 6(2), 105–113. <https://doi.org/10.1049/iet-cdt.2011.0033>
- Ebeling, C., Cronquist, D. C., & Franklin, P. (1996). RaPiD — Reconfigurable pipelined datapath. Teoksessa *Field-Programmable Logic Smart Applications, New Paradigms and Compilers. FPL 1996. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 1142, ss. 126–135). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-61730-2_13
- Enzler, R., Plessl, C., & Platzner, M. (2003). Virtualizing Hardware with Multi-context Reconfigurable Arrays. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2003. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2778, ss. 151–160). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45234-8_16
- Estrin, G. (1960). Organization of computer systems. *Papers presented at the May 3-5, 1960, western joint IRE-AIEE-ACM computer conference on - IRE-AIEE-ACM '60 (Western)*, 33. <https://doi.org/10.1145/1460361.1460365>
- Estrin, G. (2002). Reconfigurable computer origins: the UCLA fixed-plus-variable (F+V) structure computer. *IEEE Annals of the History of Computing*, 24(4), 3–9. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2002.1114865>
- Ferianc, M., Fan, H., Chu, R. S. W., Stano, J., & Luk, W. (2020). Improving Performance Estimation for FPGA-Based Accelerators for Convolutional Neural Networks. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2020. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 12083, ss. 3–13). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44534-8_1
- Flynn, M. J., & Luk, W. (2011). *Computer System Design : System-On-Chip*. John Wiley & Sons, Incorporated. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=693260>
- Fu, H., Mencer, O., & Luk, W. (2008). Optimizing residue arithmetic on FPGAs. *2008 International Conference on Field-Programmable Technology*, 41–48. <https://doi.org/10.1109/FPT.2008.4762364>

- Gaitonde, D. (2023, elokuuta 27). AMD Next Generation FPGA Built From Chiplets. *Hot Chips 2023*. <https://hc2023.hotchips.org/assets/program/conference/day2/FPGAs%20Cooling/HC%20XCVP1902%20Final%2020230816%20-%20Embargoed%20until%20Aug%2029%202023.pdf>
- Galuzzi, C., & Bertels, K. (2008). The Instruction-Set Extension Problem: A Survey. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2008. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4943, ss. 209–220). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78610-8_21
- Gan, L., Fu, H., Luk, W., Yang, C., Xue, W., Huang, X., Zhang, Y., & Yang, G. (2013). Accelerating solvers for global atmospheric equations through mixed-precision data flow engine. *2013 23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/FPL.2013.6645508>
- Gayasen, A., Lee, K., Vijaykrishnan, N., Kandemir, M., Irwin, M. J., & Tuan, T. (2004). A Dual-VDD Low Power FPGA Architecture. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2004. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 3203, ss. 145–157). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30117-2_17
- Gokhale, M., Dubois, D., Dubois, A., Boorman, M., Poole, S., & Hogsett, V. (2002). Granidt: Towards Gigabit Rate Network Intrusion Detection Technology. Teoksessa *Field-Programmable Logic and Applications: Reconfigurable Computing Is Going Mainstream. FPL 2002. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2438, ss. 404–413). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-46117-5_43
- Gokhale, M., Holmes, W., Kopser, A., Lucas, S., Minnich, R., Sweely, D., & Lopresti, D. (1991). Building and using a highly parallel programmable logic array. *Computer*, 24(1), 81–89. <https://doi.org/10.1109/2.67197>
- Gokhale, M., Stone, J., Arnold, J., & Kalinowski, M. (2000). Stream-oriented FPGA computing in the Streams-C high level language. *Proceedings 2000 IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (Cat. No.PR00871)*, 49–56. <https://doi.org/10.1109/FPGA.2000.903392>

- Gort, M., & Anderson, J. (2014). Design re-use for compile time reduction in FPGA high-level synthesis flows. *2014 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)*, 4–11. <https://doi.org/10.1109/FPT.2014.7082746>
- Greenfield, T., & Greener, S. (2016). *Research Methods for Postgraduates* (3. p.). John Wiley & Sons, Incorporated. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=4644084>
- Guajardo, J., Kumar, S. S., Schrijen, G.-J., & Tuyls, P. (2007). Physical Unclonable Functions and Public-Key Crypto for FPGA IP Protection. *2007 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 189–195. <https://doi.org/10.1109/FPL.2007.4380646>
- Guccione, S., Levi, D., & Sundararajan, P. (1999). JBits: Java based interface for reconfigurable computing. Teoksessa *2nd annual military and aerospace applications of programmable devices and technologies conference (MAPLD)* (Vsk. 261).
- Gusenbauer, M. (2024). Beyond Google Scholar, Scopus, and Web of Science: An evaluation of the backward and forward citation coverage of 59 databases' citation indices. *Research Synthesis Methods*, 15(5), 802–817. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1729>
- Hannig, F., Ruckdeschel, H., Dutta, H., & Teich, J. (2008). PARO: Synthesis of Hardware Accelerators for Multi-dimensional Dataflow-Intensive Applications. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2008. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4943, ss. 287–293). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78610-8_30
- Happe, M., Traber, A., & Keller, A. (2015). Preemptive Hardware Multitasking in ReconOS. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. ARC 2015. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 9040, ss. 79–90). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_7
- Hauck, S., Fry, T. W., Hosler, M. M., & Kao, J. P. (1997). The Chimaera reconfigurable functional unit. *Proceedings. The 5th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines Cat. No.97TB100186*, 87–96. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1997.624608>

- Hauck, S., Zhiyuan Li, & Schwabe, E. (1998). Configuration compression for the Xilinx XC6200 FPGA. *Proceedings. IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines* (Cat. No.98TB100251), 138–146. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1998.707891>
- Hauser, J. R., & Wawrzynek, J. (1997). Garp: a MIPS processor with a reconfigurable co-processor. *Proceedings. The 5th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines* Cat. No.97TB100186), 12–21. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1997.624600>
- Haynes, S. D., Cheung, P. Y. K., Luk, W., & Stone, J. (1999). SONIC - a plug-in architecture for video processing. *Seventh Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines* (Cat. No.PR00375), 280–281. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1999.803697>
- Heath, J. R., Kuekes, P. J., Snider, G. S., & Williams, R. S. (1998). A Defect-Tolerant Computer Architecture: Opportunities for Nanotechnology. *Science*, 280(5370), 1716–1721. <https://doi.org/10.1126/science.280.5370.1716>
- Heiner, J., Sellers, B., Wirthlin, M., & Kalb, J. (2009). FPGA partial reconfiguration via configuration scrubbing. *2009 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 99–104. <https://doi.org/10.1109/FPL.2009.5272543>
- Heinz, C., Hofmann, J., Korinth, J., Sommer, L., Weber, L., & Koch, A. (2021). The TaPaSCo Open-Source Toolflow for the Automated Composition of Task-Based Parallel Reconfigurable Computing Systems. *Journal of Signal Processing Systems*, 93(5), 545–563. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01640-8>
- Heinz, C., & Koch, A. (2021). Supporting On-Chip Dynamic Parallelism for Task-Based Hardware Accelerators. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2021. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 12700, ss. 81–92). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79025-7_6
- Hoang, D. T. (1993). Searching genetic databases on Splash 2. *[1993] Proceedings IEEE Workshop on FPGAs for Custom Computing Machines*, 185–191. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1993.279464>

- Holmberg, K. J. (2015). *Altmetrics for Information Professionals : Past, Present and Future*. Elsevier Science & Technology. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=4003120>
- Hong, D., Li, C., Yokoya, N., Zhang, B., Jia, X., Plaza, A., Gamba, P., Benediktsson, J. A., & Chanussot, J. (2026). Hyperspectral imaging. *Nature Reviews Methods Primers*, 6(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s43586-026-00476-5>
- Hung, E., Jamal, A.-S., & Wilton, S. J. E. (2013). Maximum flow algorithms for maximum observability during FPGA debug. *2013 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)*, 20–27. <https://doi.org/10.1109/FPT.2013.6718324>
- Hutchings, B., Bellows, P., Hawkins, J., Hemmert, S., Nelson, B., & Rytting, M. (1999). A CAD suite for high-performance FPGA design. *Seventh Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (Cat. No.PR00375)*, 12–24. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1999.803663>
- Hutchings, B. L., Franklin, R., & Carver, D. (2002). Assisting network intrusion detection with reconfigurable hardware. *Proceedings. 10th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 111–120. <https://doi.org/10.1109/FPGA.2002.1106666>
- Hutton, M., Schleicher, J., Lewis, D., Pedersen, B., Yuan, R., Kaptanoglu, S., Baeckler, G., Ratchev, B., Padalia, K., Bourgeault, M., Lee, A., Kim, H., & Saini, R. (2004). Improving FPGA Performance and Area Using an Adaptive Logic Module. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2004. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 3203, ss. 135–144). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30117-2_16
- Kalms, L., Rad, P. A., Ali, M., Iskander, A., & Göhringer, D. (2021). A Parametrizable High-Level Synthesis Library for Accelerating Neural Networks on FPGAs. *Journal of Signal Processing Systems*, 93(5), 513–529. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01651-5>
- Kalte, H., & Pormann, M. (2005). Context saving and restoring for multitasking in reconfigurable systems. *International Conference on Field Programmable Logic and Applications, 2005.*, 223–228. <https://doi.org/10.1109/FPL.2005.1515726>

- Kapre, N., & DeHon, A. (2011). VLIW-SCORE: Beyond C for sequential control of SPICE FPGA acceleration. *2011 International Conference on Field-Programmable Technology*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/FPT.2011.6132678>
- Kapre, N., Mehta, N., deLorimier, M., Rubin, R., Barnor, H., Wilson, M. J., Wrighton, M., & DeHon, A. (2006). Packet Switched vs. Time Multiplexed FPGA Overlay Networks. *2006 14th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 205–216. <https://doi.org/10.1109/FCCM.2006.55>
- Knuth, D. E. (1972). George Forsythe and the development of computer science. *Communications of the ACM*, 15(8), 721–726. <https://doi.org/10.1145/361532.361538>
- Koch, D., Beckhoff, C., & Teich, J. (2008). ReCoBus-Builder - A novel tool and technique to build statically and dynamically reconfigurable systems for FPGAs. *2008 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 119–124. <https://doi.org/10.1109/FPL.2008.4629918>
- Kuon, I., & Rose, J. (2007). Measuring the Gap Between FPGAs and ASICs. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 26(2), 203–215. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2006.884574>
- LaForest, C. E., & Steffan, J. G. (2010). Efficient multi-ported memories for FPGAs. *Proceedings of the 18th annual ACM/SIGDA international symposium on Field programmable gate arrays*, 41–50. <https://doi.org/10.1145/1723112.1723122>
- Lemieux, G., Lee, E., Tom, M., & Yu, A. (2004). Directional and single-driver wires in FPGA interconnect. *Proceedings. 2004 IEEE International Conference on Field- Programmable Technology (IEEE Cat. No.04EX921)*, 41–48. <https://doi.org/10.1109/FPT.2004.1393249>
- Lemieux, G., & Lewis, D. (2001). Using sparse crossbars within LUT. *Proceedings of the 2001 ACM/SIGDA ninth international symposium on Field programmable gate arrays*, 59–68. <https://doi.org/10.1145/360276.360299>
- Leong, P. H. W., Amano, H., Anderson, J., Bertels, K., Cardoso, J. M. P., Diessel, O., Gogniat, G., Hutton, M., Lee, J., Luk, W., Lysaght, P., Platzner, M., Prasanna, V. K., Rissa, T., Silvano, C., So, H. K.-H., & Wang, Y. (2017). The First 25 Years of the FPL Conference.

- ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 10(2), 1–17.
<https://doi.org/10.1145/2996468>
- Leong, P. H. W., Leong, M. P., Cheung, O. Y. H., Tung, T., Kwok, C. M., Wong, M. Y., & Lee, K. H. (2001). Pilchard - a reconfigurable computing platform with memory slot interface. *The 9th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'01)*, 170–179. <https://doi.org/10.1109/FCCM.2001.36>
- Lewis, D., Betz, V., Jefferson, D., Lee, A., Lane, C., Leventis, P., Marquardt, S., McClintock, C., Pedersen, B., Powell, G., Reddy, S., Wysocki, C., Cliff, R., & Rose, J. (2003). The Stratix routing and logic architecture. *Proceedings of the 2003 ACM/SIGDA eleventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 12–20. <https://doi.org/10.1145/611817.611821>
- Li, Z., Compton, K., & Hauck, S. (2000). Configuration caching management techniques for reconfigurable computing. *Proceedings 2000 IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (Cat. No.PR00871)*, 22–36. <https://doi.org/10.1109/FPGA.2000.903390>
- Lindelöw, C. H., Hammarfelt, B., & Mazoni, A. (2025). Data sources used in bibliometrics 1978–2022: From proprietary databases to the great wide open. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 76(9), 1227–1240. <https://doi.org/10.1002/asi.25018>
- Lopes, A. R., & Constantinides, G. A. (2008). A High Throughput FPGA-Based Floating Point Conjugate Gradient Implementation. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2008. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 4943, ss. 75–86). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78610-8_10
- Ludwin, A., Betz, V., & Padalia, K. (2008). High-quality, deterministic parallel placement for FPGAs on commodity hardware. *Proceedings of the 16th international ACM/SIGDA symposium on Field programmable gate arrays*, 14–23. <https://doi.org/10.1145/1344671.1344676>

- Lysaght, P., Blodget, B., Mason, J., Young, J., & Bridgford, B. (2006). Invited Paper: Enhanced Architectures, Design Methodologies and CAD Tools for Dynamic Reconfiguration of Xilinx FPGAs. *2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/FPL.2006.311188>
- Lysaght, P., & Dunlop, J. (1994). Dynamic Reconfiguration of FPGAs. Teoksessa W. R. Moore & W. Luk (Toim.), *More FPGAs: Edited from the Oxford 1993 International Workshop on Field Programmable Logic and Applications* (ss. 82–94). Abingdon EE&CS Books.
- Marescaux, T., Mignolet, J.-Y., Bartic, A., Moffat, W., Verkest, D., Vernalde, S., & Lauwereins, R. (2003). Networks on Chip as Hardware Components of an OS for Reconfigurable Systems. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2003. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2778, ss. 595–605). https://doi.org/10.1007/978-3-540-45234-8_58
- Marquardt, A., Betz, V., & Rose, J. (2000). Timing-driven placement for FPGAs. *Proceedings of the 2000 ACM/SIGDA eighth international symposium on Field programmable gate arrays*, 203–213. <https://doi.org/10.1145/329166.329208>
- Marquardt, A. (Sandy), Betz, V., & Rose, J. (1999). Using cluster-based logic blocks and timing-driven packing to improve FPGA speed and density. *Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 37–46. <https://doi.org/10.1145/296399.296426>
- McGraw-Hill encyclopedia of science & technology* (11. p.). (2012). McGraw-Hill. <https://archive.org/details/mcgrawhillencycl0001unse>
- McMurchie, L., & Ebeling, C. (1995). PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs. *Proceedings of the 1995 ACM third international symposium on Field-programmable gate arrays*, 111–117. <https://doi.org/10.1145/201310.201328>
- Mei, B., Vernalde, S., Verkest, D., De Man, H., & Lauwereins, R. (2003). ADRES: An Architecture with Tightly Coupled VLIW Processor and Coarse-Grained Reconfigurable Matrix. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2003. Lecture*

- Notes in Computer Science* (Vsk. 2778, ss. 61–70). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45234-8_7
- Mencer, O., Hübert, H., Morf, M., & Flynn, M. J. (2000). StReAm: Object-Oriented Programming of Stream Architectures Using PAM-Blox. Teoksessa R. W. Hartenstein & H. Grünbacher (Toim.), *Field-Programmable Logic and Applications: The Roadmap to Reconfigurable Computing. FPL 2000. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 1896, ss. 595–604). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-44614-1_64
- Mirsky, E., & DeHon, A. (1996). MATRIX: a reconfigurable computing architecture with configurable instruction distribution and deployable resources. *Proceedings IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines FPGA-96*, 157–166. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1996.564808>
- Mpakos, P., Tasou, I., Alverti, C., Miliadis, P., Malakonakis, P., Theodoropoulos, D., Goumas, G., Pnevmatikatos, D. N., & Koziris, N. (2024). Open-Source SpMV Multiplication Hardware Accelerator for FPGA-Based HPC Systems. Teoksessa I. Skliarova, P. Brox Jiménez, M. Véstias, & P. C. Diniz (Toim.), *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2024. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 14533, ss. 19–32). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55673-9_2
- National Academies of Sciences and Engineering and Medicine. (2019). *Quantum Computing: Progress and Prospects* (E. Grumbling & M. Horowitz, Toim.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25196>
- Oetken, A., Wildermann, S., Teich, J., & Koch, D. (2010). A Bus-Based SoC Architecture for Flexible Module Placement on Reconfigurable FPGAs. *2010 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 234–239. <https://doi.org/10.1109/FPL.2010.54>
- Pagonis, G., Leon, V., Soudris, D., & Lentaris, G. (2023). Increasing the Fault Tolerance of COTS FPGAs in Space: SEU Mitigation Techniques on MPSoC. Teoksessa *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelli-*

- gence and Lecture Notes in Bioinformatics*): 14251 LNCS (ss. 215–229). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42921-7_15
- Papakonstantinou, A., Gururaj, K., Stratton, J. A., Chen, D., Cong, J., & Hwu, W.-M. W. (2009). FCUDA: Enabling efficient compilation of CUDA kernels onto FPGAs. *2009 IEEE 7th Symposium on Application Specific Processors*, 35–42. <https://doi.org/10.1109/SASP.2009.5226333>
- Park, H., Vijayvargiya, S., & DeHon, A. (2015). Energy minimization in the time-space continuum. *2015 International Conference on Field Programmable Technology (FPT)*, 64–71. <https://doi.org/10.1109/FPT.2015.7393131>
- Petersen, R. J., & Hutchings, B. L. (1995). An assessment of the suitability of FPGA-based systems for use in digital signal processing. Teoksessa *Field-Programmable Logic and Applications. FPL 1995. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 975, ss. 293–302). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-60294-1_123
- Plagwitz, P., Hannig, F., Teich, J., & Keszocze, O. (2024). SNN vs. CNN Implementations on FPGAs: An Empirical Evaluation. Teoksessa I. Skliarova, P. Brox Jiménez, M. Véstias, & P. C. Diniz (Toim.), *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2024. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 14553, ss. 3–18). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55673-9_1
- Poczek, K., Tessier, R., & Dehon, A. (2013). Birth and adolescence of reconfigurable computing: a survey of the first 20 years of field-programmable custom computing machines. *2013 IEEE 21st Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 1–17. <https://doi.org/10.1109/FPGA.2013.6882273>
- Poon, K. K. W., Yan, A., & Wilton, S. J. E. (2002). A Flexible Power Model for FPGAs. Teoksessa *Field-Programmable Logic and Applications: Reconfigurable Computing Is Going Mainstream. FPL 2002. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2438, ss. 312–321). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-46117-5_33
- Ralston, A., Reilly, E. D., & Hemmendinger, D. (Toim.). (2003). *Encyclopedia of Computer Science* (4. p.). John Wiley and Sons Ltd. <https://dl-acm-org.proxy.uwasa.fi/doi/book/10.5555/1074100>

- Razdan, R., & Smith, M. D. (1994). A high-performance microarchitecture with hardware-programmable functional units. *Proceedings of the 27th annual international symposium on Microarchitecture - MICRO 27*, 172–180. <https://doi.org/10.1145/192724.192749>
- Rizakis, M., Venieris, S. I., Kouris, A., & Bouganis, C.-S. (2018). Approximate FPGA-Based LSTMs Under Computation Time Constraints. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2018. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 10824, ss. 3–15). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78890-6_1
- Sakiyama, K., Mentens, N., Batina, L., Preneel, B., & Verbauwhede, I. (2006). Reconfigurable Modular Arithmetic Logic Unit for High-Performance Public-Key Cryptosystems. Teoksessa *Reconfigurable Computing: Architectures and Applications. ARC 2006. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 3985, ss. 347–357). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11802839_43
- Sasdrich, P., & Güneysu, T. (2015). Implementing Curve25519 for Side-Channel-Protected Elliptic Curve Cryptography. *ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems*, 9(1), 1–15. <https://doi.org/10.1145/2700834>
- Schmit, H. (1997). Incremental reconfiguration for pipelined applications. *Proceedings. The 5th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines Cat. No.97TB100186*, 47–55. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1997.624604>
- Shang, L., Kaviani, A. S., & Bathala, K. (2002). Dynamic power consumption in Virtex™-II FPGA family. *Proceedings of the 2002 ACM/SIGDA tenth international symposium on Field-programmable gate arrays*, 157–164. <https://doi.org/10.1145/503048.503072>
- Sidhu, R., & Prasanna, V. K. (2001). Fast Regular Expression Matching Using FPGAs. *The 9th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'01)*, 227–238. <https://ieeexplore-ieee-org.proxy.uwasa.fi/document/1420919>
- Simmler, H., Levinson, L., & Männer, R. (2000). Multitasking on FPGA Coprocessors. Teoksessa *Field-Programmable Logic and Applications: The Roadmap to Reconfigurable*

- Computing. FPL 2000. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 1896, ss. 121–130). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-44614-1_13
- Snider, G. (2002). Performance-constrained pipelining of software loops onto reconfigurable hardware. *Proceedings of the 2002 ACM/SIGDA tenth international symposium on Field-programmable gate arrays*, 177–186. <https://doi.org/10.1145/503048.503075>
- Sourdis, I., & Pnevmatikatos, D. (2003). Fast, Large-Scale String Match for a 10Gbps FPGA-Based Network Intrusion Detection System. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2003. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2778, ss. 880–889). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45234-8_85
- Su, J., Faraone, J., Liu, J., Zhao, Y., Thomas, D. B., Leong, P. H. W., & Cheung, P. Y. K. (2018). Redundancy-Reduced MobileNet Acceleration on Reconfigurable Logic for ImageNet Classification. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2018. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 10824, ss. 16–28). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78890-6_2
- Takamaeda-Yamazaki, S. (2015). Pyverilog: A Python-Based Hardware Design Processing Toolkit for Verilog HDL. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. ARC 2015. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 9040, ss. 451–460). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_42
- Tatsumura, K., Yazdanshenas, S., & Betz, V. (2016). High density, low energy, magnetic tunnel junction based block RAMs for memory-rich FPGAs. *2016 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)*, 4–11. <https://doi.org/10.1109/FPT.2016.7929181>
- Taub, A. H. (1963). *John Von Neumann: Collected works. Volume V. Design of computers, theory of automata and numerical analysis. The general and logical theory of automata*. Pergamon Press.
- TCFPGA. (2026, toukokuuta 27). *About the Technical Committee*. <https://tcfpga.org/books/about-tcfpga/page/about-the-technical-committee>

- Tian, X., & Benkrid, K. (2009). American option pricing on reconfigurable hardware using Least-Squares Monte Carlo method. *2009 International Conference on Field-Programmable Technology*, 263–270. <https://doi.org/10.1109/FPT.2009.5377662>
- Trimberger, S., Carberry, D., Johnson, A., & Wong, J. (1997). A time-multiplexed FPGA. *Proceedings. The 5th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines Cat. No.97TB100186*, 22–28. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1997.624601>
- Tsu, W., Macy, K., Joshi, A., Huang, R., Walker, N., Tung, T., Rowhani, O., George, V., Wawrzynek, J., & DeHon, A. (1999). HSRA: high-speed, hierarchical synchronous reconfigurable array. *Proceedings of the 1999 ACM/SIGDA seventh international symposium on Field programmable gate arrays*, 125–134. <https://doi.org/10.1145/296399.296442>
- Underwood, K. (2004). FPGAs vs. CPUs. *Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 171–180. <https://doi.org/10.1145/968280.968305>
- Underwood, K. D., & Hemmert, K. S. (2004). Closing the Gap: CPU and FPGA Trends in Sustainable Floating-Point BLAS Performance. *12th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines*, 219–228. <https://doi.org/10.1109/FCCM.2004.21>
- Van Chu, T., Kitajima, R., Kawamura, K., Yu, J., & Motomura, M. (2021). A High-Performance and Flexible FPGA Inference Accelerator for Decision Forests Based on Prior Feature Space Partitioning. *2021 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/ICFPT52863.2021.9609699>
- Vargas, A. C., Espinoza-Mina, M., López Alvarez, D., & Navarro Espinosa, J. (2022). Bibliometric Software: The Most Commonly Used in Research. Teoksessa Florez H., Galpin I., & Grevisse C. (Toim.), *CEUR Workshop Proceedings* (ss. 47–65). CEUR-WS. <http://ceur-ws.org>
- Varghese, J., Butts, M., & Batcheller, J. (1993). An efficient logic emulation system. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 1(2), 171–174. <https://doi.org/10.1109/92.238418>

- Villasenor, Schoner, Kang-Ngee Chia, Zapata, Hea Joung Kim, Jones, Lansing, & Mangione-Smith. (1996). Configurable computing solutions for automatic target recognition. *Proceedings IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines FPGA-96*, 70–79. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1996.564749>
- Von Herzen, B. (1997). Signal processing at 250 MHz using high-performance FPGA's. *Proceedings of the 1997 ACM fifth international symposium on Field-programmable gate arrays - FPGA '97*, 62–68. <https://doi.org/10.1145/258305.258313>
- Vuillemin, J. E., Bertin, P., Roncin, D., Shand, M., Touati, H. H., & Boucard, P. (1996). Programmable active memories: reconfigurable systems come of age. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 4(1), 56–69. <https://doi.org/10.1109/92.486081>
- Wilton, S. J. E., Ang, S.-S., & Luk, W. (2004). The Impact of Pipelining on Energy per Operation in Field-Programmable Gate Arrays. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2004. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 3203, ss. 719–728). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30117-2_73
- Wirthlin, M. J., & Hutchings, B. L. (1995). A dynamic instruction set computer. *Proceedings IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines*, 99–107. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1995.477415>
- Wittig, R. D., & Chow, P. (1996). OneChip: an FPGA processor with reconfigurable logic. *Proceedings IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines FPGA-96*, 126–135. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1996.564773>
- Xilinx. (1988). *The Programmable Gate Array Data Book*. Xilinx, Inc.
- Yan, A., Cheng, R., & Wilton, S. J. E. (2002). On the sensitivity of FPGA architectural conclusions to experimental assumptions, tools, and techniques. *Proceedings of the 2002 ACM/SIGDA tenth international symposium on Field-programmable gate arrays*, 147–156. <https://doi.org/10.1145/503048.503071>
- Yan, A., & Wilton, S. J. E. (2003). Product-term based synthesizable embedded programmable logic cores. *Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Field-Programmable Technology (FPT) (IEEE Cat. No.03EX798)*, 162–169. <https://doi.org/10.1109/FPT.2003.1275744>

- Yu, C. W., Kwong, K. H., Lee, K. H., & Leong, P. H. W. (2003). A Smith-Waterman Systolic Cell. Teoksessa *Field Programmable Logic and Application. FPL 2003. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 2778, ss. 375–384). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45234-8_37
- Yu, Z., & Bouganis, C.-S. (2020). A Parameterisable FPGA-Tailored Architecture for YOLOv3-Tiny. Teoksessa F. Rincón, J. Barba, H. K. H. So, P. Diniz, & J. Caba (Toim.), *Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications. ARC 2020. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 12083, ss. 330–344). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44534-8_25
- Zhang, C., Li, P., Sun, G., Guan, Y., Xiao, B., & Cong, J. (2015). Optimizing FPGA-based Accelerator Design for Deep Convolutional Neural Networks. *Proceedings of the 2015 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*, 161–170. <https://doi.org/10.1145/2684746.2689060>
- Zhao, R., Niu, X., Wu, Y., Luk, W., & Liu, Q. (2017). Optimizing CNN-Based Object Detection Algorithms on Embedded FPGA Platforms. Teoksessa *Applied Reconfigurable Computing. ARC 2017. Lecture Notes in Computer Science* (Vsk. 10216, ss. 255–267). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56258-2_22
- Zhong, P., Martonosi, M., Ashar, P., & Malik, S. (1998). Accelerating Boolean satisfiability with configurable hardware. *Proceedings. IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines (Cat. No.98TB100251)*, 186–195. <https://doi.org/10.1109/FPGA.1998.707896>
- Ziener, D., & Teich, J. (2006). FPGA core watermarking based on power signature analysis. *2006 IEEE International Conference on Field Programmable Technology*, 205–212. <https://doi.org/10.1109/FPT.2006.270313>