Euroopan unionin osarahoittama

SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta

Tampereen yliopisto

Katsaus digitaalisten kaksosten suunnittelun ja toteutuksen teknologioihin



DIGI2-hanke, Tampereen yliopisto

Toukokuu 2025
(v0.15 2025-05-05)

Sisällys

Käsiteluettelo iii

Lyhenteet iii

1 Johdanto 1

2 Digitaalinen kaksonen – määritelmiä ja malleja 2
2.1 Sovellusalueita . . . 2
2.2 Mallit . . . 3
2.3 Yhteydet muihin teknologioihin . . . 4

3 Digitaalisen kaksosen elinkaari 5

4 Käsitteitä ja sovelluskohteita 8
4.1 Älykkään tuotannon tutkimusteemoja . . . 10
4.2 Robotiikka älykkäässä tuotannossa . . . 10
4.3 Älykkäät kaupungit . . . 12
4.4 Rakennusalan digitaaliset kaksoset . . . 13
4.5 Terveydenhuolto . . . 14
4.6 Metaverse . . . 15
4.7 Tekoäly ja koneoppiminen digitaalisissa kaksosissa . . . 17
4.8 Tietoturva ja muut turvallisuus näkökulmat . . . 18
4.9 Digitaalinen kaksonen kestävässä kehityksessä . . . 20
4.10 Digitaalinen kaksonen osana kuluttajien IoT:tä . . . 22

5 Case-esimerkit ja käyttötapaukset 24
5.1 Mineraaliteollisuuden digitalisointiratkaisuja . . . 25
5.2 Hitsaustuotantolinjan DT . . . 27
5.3 Tuotantolaitokset: Paperitehtaan ohjausta . . . 29
5.4 Kaupunkisuunnittelua: Älykaupungin kehittämistä . . . 31
5.5 Simulointi ja optimointi: Robottiohjattua etäkirurgiaa . . . 32
5.6 Kiinteistön huolto ja käyttö . . . 34

Kirjallisuus 38

Käsiteluettelo

Commercial IoT Teollisuuskäyttöön suunniteltuja ja markkinoituja Internet of Things (IoT)-järjestelmiä

Industry 4.0 Industry 4.0 tai Teollisuus 4.0 viittaa neljänteen teolliseen vallankumoukseen, joka kuvastaa nykyaikaisen teknologian, automaation, datan ja tekoälyn integraatiota teollisuusprosesseihin. Se sisältää teknologioita kuten IoT (esineiden internet), pilvipalvelut, Big Data, ja tekoäly, jotka yhdessä muodostavat älykkäitä ja verkostoituneita tuotantoympäristöjä.

KNX KNX (myös Konnex) on avoin väyläpohjainen hajautettu kiinteistöautomaatiojärjestelmä.

Smart City Smart City, tai älykäs kaupunki, viittaa kaupunkien kehittämiseen käyttäen erilaisia informaatio- ja kommunikaatioteknologioita (ICT) sekä muita keinoja parantaakseen asukkaiden elämänlaatua, tehokkuutta kaupungin palveluissa ja toiminnoissa, kestävää kehitystä ja taloudellista kehitystä. Älykkäät kaupungit hyödyntävät esimerkiksi sensoriteknologiaa, IoT:tä (esineiden internet), big dataa ja tekoälyä kerätäkseen tietoa ja optimoidakseen kaupungin toimintoja, kuten liikenteen hallintaa, jätteenhuoltoa, energiankäyttöä ja kaupunkisuunnittelua.

ZigBee ZigBee on lyhyen kantaman vähävirtainen tietoliikenneverkko.

Lyhenteet

AECO Architecture, Engineering, Construction, and Operations

API Application Programming Interface

AR Augmented Reality

BIM Building Information Modeling

BMS Building Management System

CAD Computer-aided Design

CIoT Consumer IoT

CNN Convolutional Neural Networks

DALI Digital Addressable Lighting Interface

DDoS Distributed Denial of Service

DL	Deep Learning
DT	Digital Twin
EEG	Electroencephalography
EMG	Electromyography
HMD	Head Mounted Display
IFC	Industry Foundation Classes
IIoT	Industrial Internet of Things
IMS	Information Management System
IoT	Internet of Things
LO	Logical Object
MEC	Multi-access Edge Computing
MEP	Mechanical, Electrical and Plumbing
ML	Machine Learning
NIST	National Institute of Standards and Technology
O&M	Operations & Managements
OPCUA	OPC Unified Architecture
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PDF	Portable Document Format
PO	Physical Object
REST	Representational State Transfer
RNN	Recurrent Neural Network
SAoIM	Sustainability Assessment of Intelligent Manufacturing
SDK	Software Development Kit
UML	Unified Modeling Language
UR3	Universal Robots 3 series
VPN	Virtual Private Network
VR	Virtual Reality
VTT	Valtion tieteellinen tutkimuskeskus

Luku 1

Johdanto

Tämä kirjallisuuskatsaus on osa EAKR-rahoitteista, ja Tampereen yliopiston Porin yksikön SEIntS-tutkimusryhmän toteuttaa DIGI2-hanketta.

Satakunnan alueen tulevaisuuden vientiä ja kilpailukykyä sekä työvoiman kiinnostusta Satakunnasta on mahdollista vahvistaa digitalisaatioon perustuvalla osaamisella, ja siinä digitaaliset kaksoset, eli Digital Twins (DTs), tarjoavat potentiaalisia kehityskohteita toimialasta riippumatta. Keskittymällä kevyempiin ja siten investointikuluiltaan edullisempiin vaihtoehtoihin, ja jakamalla hankintaselvityksiin tarvittavaa tietoa, voidaan digitaalisten kaksosten käyttöä edistää myös PK-sektorilla. Modernien DT-järjestelmien käyttö ja kehittäminen myös osaltaan lisää alueen vetovoimaa potentiaalisten työntekijöiden ja yritysten silmissä.

Hankkeen tavoitteena on tuoda yhteiskehittämisen kautta tutkimustietoa ja teknistä osaamista digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen Satakunnan elinkeinoelämän käyttöön. Tämä teknologiakatsaus kartoittaa digitaalisten kaksosten suunnittelun ja implementaation teknologioita. Teknologiakatsauksen pohjana hyödynnetään DIGI2-hankkeessa aiemmin suoritetun digitaalisiin kaksosiin keskittyneen kirjallisuuskatsauksen (Grönman et al., 2023) tuloksia, jossa luokiteltiin alan tieteellisiä artikkeleita.

Kirjallisuuskatsaus on tarkoitettu yritysten ja organisaatioiden johdolle tai kehitystyöstä vastaaville tahoille. Katsauksen tarkoitus on tarjota lukijalleen perustietoa ja ideoita digitaalisen kaksosen käyttö- ja hyödyntämistavoista.

Luku 2

Digitaalinen kaksonen – määritelmiä ja malleja

Tässä luvussa tarkistellaan DT:n sovellusalueet sekä määritelmät ja mallit yleisellä tasolla. Grieves ja Vickers (2017) kuvailee digitaalinen kaksosen olevan virtuaalinen versio fyysisestä esineestä, prosessista tai järjestelmästä, jota voidaan käyttää simuloimaan, seuraamaan ja optimoimaan suorituskykyä. Kaksonen on pohjimmiltaan kopio fyysisestä kohteesta, jota voidaan analysoida ja testata ilman suoraa fyysistä interaktiota itse kohteeseen.

2.1 Sovellusalueita

Mahdollisia sovellusalueita on laaja kirjo, kuten valmistus, rakentaminen, terveydenhuolto, liikenne ja energia. DT:ta voidaan käyttää mallintamaan erilaisia fyysisiä esineitä ja järjestelmiä, kuten rakennuksia, tehtaita, lentokoneita ja jopa kokonaisia kaupunkeja. Digitaaliset kaksoset luodaan yhdistämällä tietoa useista lähteistä, kuten sensoreista, ohjelmistoista ja muista järjestelmistä (Enders ja Hoßbach, 2019). Usein ajatellaan, että digitaaliset kaksoset ovat yksi niistä teknologioista, joilla on mahdollisuus mullistaa fyysisten esineiden ja järjestelmien suunnittelu, rakentaminen ja käyttö. Ne voivat auttaa yrityksiä parantamaan tehokkuutta, vähentämään kustannuksia ja lisäämään turvallisuutta, mikä tekee niistä arvokkaan työkalun monilla eri teollisuudenaloilla.

Boje et al. (2020) mukaan suurimmat hyödyt digitaalisten kaksosen käytössä ovat:

Tehokkuuden parantuminen digitaaliset kaksoset voivat auttaa optimoimaan fyysisten esineiden ja järjestelmien suorituskykyä simuloimalla ja analysoimalla niiden käyttäytymistä reaaliajassa. Tämä mahdollistaa parantuneen tehokkuuden, vähentyneet käyttökatkokset ja parantuneen tuottavuuden.

Ennakoiva huolto jatkuvasti seuraamalla fyysisten omaisuuserien suorituskykyä digitaaliset kaksoset voivat tunnistaa milloin huoltoa tarvitaan, vähentäen täten ennakoimattomien käyttökatkojen riskiä ja parantaen omaisuuden elinikää.

Kustannussäästöt digitaaliset kaksoset voivat auttaa tunnistamaan kustannussäästökohteita optimoimalla fyysisten esineiden ja järjestelmien suorituskykyä, vähentämällä jätettä ja parantamalla tehokkuutta.

Turvallisuuden parantaminen digitaalisia kaksosia voidaan käyttää simuloimaan ja testaamaan vaarallisia tilanteita ilman riskiä ihmishengille tai fyysiselle kalustolle, parantaen täten turvallisuutta.

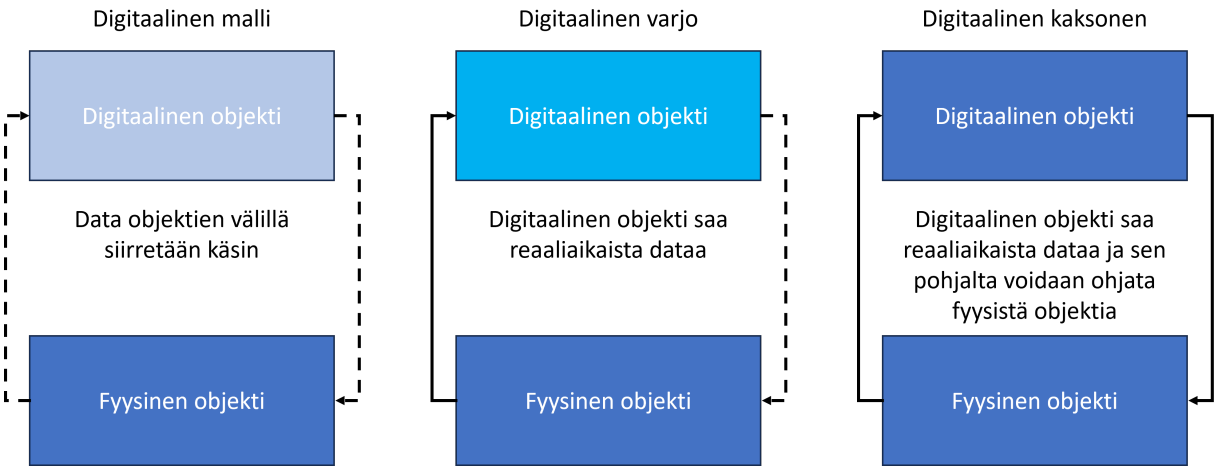
Parempi suunnittelu digitaalisia kaksosia voidaan käyttää testaamaan ja optimoimaan fyysisten esineiden ja järjestelmien suunnittelua ennen niiden rakentamista, vähentäen tarvetta kalliille mahdollisesti kalliille uudelleensuunnittelulle ja -rakentamiselle.

Etäkäyttö ja seuranta digitaaliset kaksoset voidaan ottaa käyttöön etänä, mikä mahdollistaa tiimien fyysisten omaisuuserien seurannan ja hallinnan mistäpäin maailmaa tahansa.

Yhteistyön parantaminen digitaaliset kaksoset voivat auttaa parantamaan yhteistyötä eri tiimien ja sidosryhmien välillä, mahdollistaen paremman päätöksenteon ja tehokkaamman ongelmanratkaisun.

2.2 Mallit

DT on digitaalinen mallinnus joko olemassa olevasta tai suunnitteilla olevasta reaalimaailman järjestelmästä tai prosessista. Digitaalisen kaksosen toteutukseen soveltuvat teknosoveltuvat teknologiat täytyy valita mallinnettavan järjestelmästä saatavan datan ja mallinnuksen tarpeiden mukaisesti. Reaalimaailman järjestelmästä saatavan datan laatu ja määrä on oltava riittävä, jotta siitä voidaan luoda sen tilaa reaaliaikaisesti kuvaava digitaalinen kaksonen. Dataintegraatio reaalimaailman järjestelmän ja sen digitaalisen kaksosen välillä voi olla joko täysin automaattista tai vaatia ihmistyötä jossain manuaalisessa vaiheessa (Kritzinger et al., 2018). Kuva 2.1 esittää digitaalisten kaksosten jaon dataintegraation tason perusteella malleihin, varjoihin ja kaksosiin. Digitaalinen kaksonen on dataintegraation korkein taso, jossa data liikkuu reaalimaailman järjestelmän ja sen digitaalisen kaksosen välillä automaattisesti. Sensorien mittausdata ja muu reaalimaailman järjestelmästä kerättävä ja luotu data päivittyy automaattisesti digitaaliseen kaksoseen ja digitaalisen kaksosen tilan avulla voidaan säätää reaalimaailman järjestelmää. Aiemmin reaalimaailman järjestelmästä kerätyn datan perusteella voidaan ennakoida sen käyttäytymistä säätömenetelmiin.



Kuva 2.1: Digitaalisen kaksonen kategorisointeja dataintegraatiotasoihin perustuen (mukaillen lähdettä: Nikula, 2019)

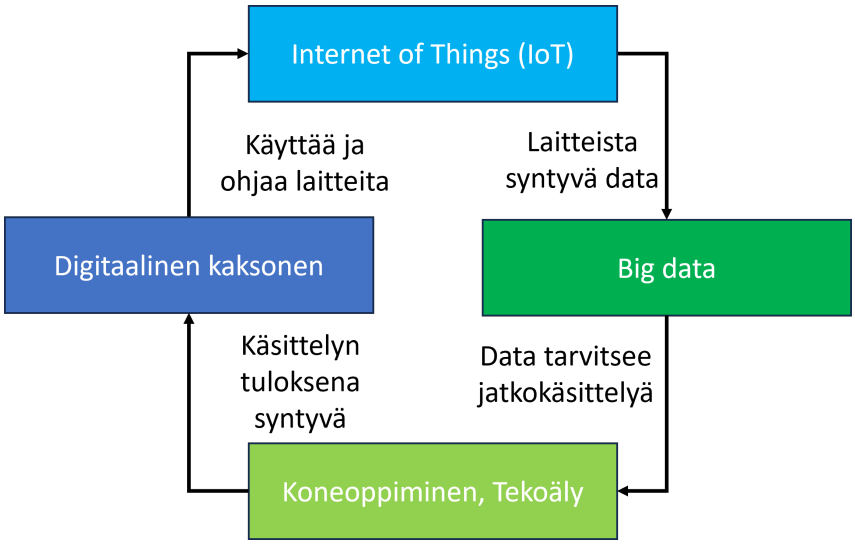
Digitaalinen malli (Digital Model) on staattinen esitys fyysisestä objektista tai järjestelmästä. Se voi olla esimerkiksi yksinkertainen malli tietystä komponentista aina monimutkaisempiin malleihin kokonaisesta rakennuksesta. Tämä malli ei päivity reaaliajassa eikä sillä ole yleensä kykyä simuloida tai ennustaa käyttäytymistä muuttuvissa olosuhteissa. Muutokset digitaaliseen malliin eivät myöskään vaikuta fyysiseen objektiin. Digitaalinen malli on perustana digitaaliselle kaksoselle.

Digitaalinen varjo (Digital Shadow) on digitaalinen esitys fyysisestä objektista, laitteesta tai järjestelmästä, mikä käyttää automaattisesti kerättyä dataa kyseisestä kohteesta. Toisin kuin digitaalinen malli, digitaalinen varjo saa reaaliaikaista tietoa, mutta se ei välttämättä pysty simulointiin tai ennusteisiin samalla tavalla kuin digitaalinen kaksonen. Muutokset digitaaliseen varjoon eivät vaikuta fyysiseen objektiin, mutta digitaalinen varjo heijastaa objektin nykyistä tai historiallista tilaa.

Digitaalinen kaksonen (Digital Twin) on dataintegraation suhteen edistyksellisin digitaalinen esitys fyysisestä objektista, prosessista tai järjestelmästä. Se yhdistää digitaalisen mallin reaaliaikaiseen dataan ja tekoälyyn. Tämä mahdollistaa monimutkaiset simuloinnit, käyttäytymisen ennusteet ja mahdollisten ongelmien havaitsemisen. Digitaalista kaksosta voidaan käyttää esimerkiksi optimoimaan prosesseja, ennakoimaan huoltotarpeita tai simuloimaan erilaisia skenaarioita. Muutokset digitaaliseen kaksoseen tai fyysiseen objektiin vaikuttavat toisiinsa.

2.3 Yhteydet muihin teknologioihin

Khan et al. (2022) mukaan digitaalisella kaksosella voidaan nähdä Kuva 2.2 mukainen teknologiayhteys Internet of Things (IoT):hen, Big Dataan ja tekoälyyn. IoT-laitteet tuottavat suuria määriä uudenlaista dataa. Tätä dataa (Big Data) ja sen sisältä löydettäviä havaintoja käsittelemään tarvitaan tehokkaita algoritmeja ja tekoälyratkaisuja. Käsittelyn tuloksena voidaan luoda hyvinkin älykkäitä digitaalisia kaksosia, joiden avulla niiden reaalimaailman vastinetta (IoT) voidaan seurata ja ohjata aiempaa paremmin.



Kuva 2.2: Digitaaliseen kaksoseen liittyvien teknologioiden yhteys toisiinsa (mukaillen lähdettä: Khan et al., 2022)

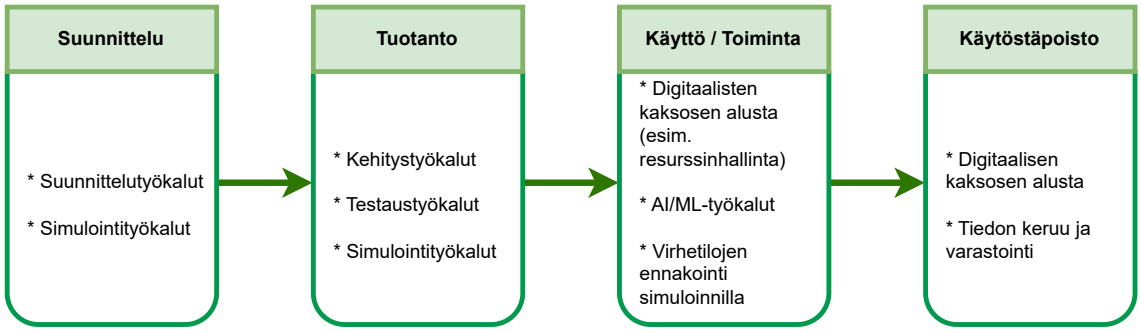
Esimerkkejä parantuneesta käsittelystä ovat mm. tapahtumien ja toimien ennakointi, optimointi, ohjaus ja ajastus, resursointi sekä dynaaminen päätöksenteko

Luku 3

Digitaalisen kaksosen elinkaari

Kuten tehdasrakennuksella, sen tuotannon laitteilla, tai yleensä kaikilla fyysisillä maailman objekteilla, niin myös niiden digitaalisilla kaksosilla on määrätty elinkaari.

Minerva et al. (2020) esittävät artikkelissaan digitaalisen kaksosen elinkaaren vaiheet (katso Kuva 3.1), jotka ovat rinnakkaisia digitaalisen kaksosen kuvaaman fyysisen maailman järjestelmän tai laitteiston elinkaaren kanssa. DT:n elinkaaren vaiheita on artikkelin mukaan neljä: luonti/suunnittelu, tuotanto, käyttö/toiminta ja käytöstäpoisto.



Kuva 3.1: Digitaalisen kaksosen elinkaari ja valikoituja työkaluja. (mukaillen lähdettä: Minerva et al., 2020)

Esitettyjen vaiheiden tarkempaa sisältöä on kuvattu seuraavassa listassa.

1. Luonti/Suunnittelu
   - Tässä vaiheessa tuotetta mietitään ja suunnitellaan. DT tässä kontekstissa esitetään loogisena objektina (Logical Object (LO)), joka on tuotteen ohjelmistoarkkitehtuuri.
   - Simulaatiotyökaluja voidaan käyttää tässä vaiheessa tuotevaihtoehtojen valintaan.
2. Tuotanto
   - Tuote valmistetaan todellisuudessa tässä vaiheessa.
   - DT auttaa optimoimaan fyysistä objektia (Physical Object (PO)) ja suorittamaan testejä, jotka muuten vaatisivat fyysisten mallien toteuttamisen.

- Simulaatiotyökaluja voidaan käyttää ennakoimaan tuotteen odotettua käyttäytymistä.

3. Käyttö/Toiminta

   - Tuotetta käytetään todellisissa olosuhteissa.
   - DT:n ja fyysisen tuotteen välinen suhde voi olla monimuotoinen. Esimerkiksi yksi DT voi edustaa monta fyysistä kopiota samasta tuotteesta.
   - Simulaatiotyökaluja voidaan käyttää tuotteen toiminnan tarkistamiseen ja ennakoimaan mahdollisia ongelmia erityisissä tilanteissa.
   - IoT-teknologiaa voidaan käyttää tuotteen käyttäytymisen ja suorituskyvyn havaitsemiseen ja mittaamiseen.

4. Käytöstäpoisto

   - Tuote otetaan pois käytöstä ja hävitetään.
   - Vaikka tätä vaihetta ei käsitelty yksityiskohtaisesti lähdemateriaalissa Minerva et al. (2020), DT voi tarjota tietoja tuotteen suorituskyvystä sen elinkaaren aikana, mikä voi auttaa päätöksenteossa sen suhteen, miten tuote hävitetään tai kierrätetään. Myös digitaalisen kaksosen alustan ja kerääntyneen datan tallentaminen ja varastointi on toteutettava suunnitellusti.

Khan et al. (2022) esittelevät laajassa artikkelissaan digitaalisten kaksosten toteuttamiseen tarjolla olevia olemassa olevia ohjelmistoja, protokollia ja standardeja. Kyseinen artikkeli listaa ja arvioi digitaalisen kaksosen elinkaaren vaiheisiin ja teknologiseen toteutukseen soveltuvia protokollia, ohjelmistoja langattomista protokollista reuna-sumu-laskennan infrastruktuurista aina listaukseen työkaluista ja niiden soveltuvuudesta digitaalisen kaksosen kehityksen eri vaiheisiin (katso Kuva 3.2).

Taulukossa on listattu DT-alustat ja määritelty niiden soveltuvuus elinkaaren eri vaiheisiin liittyvissä tehtävissä. Elinkaaren vaiheista erityisesti luonti, tuotanto ja käyttö on katettu taulukossa. Taulukossa esitettävät tehtävät ovat DT:n evoluutio, mallinnus, DT:n datanhallinta, palvelut ja yhteydet.

Taulukossa näkyvät työkalut ovat teollisuudessa käytössä olevia, saatavilla olevia työkaluja. Taulukossa esiintyvistä työkaluista Predix on General Electricin kehittämä alusta, joka on suunniteltu erityisesti teollisten IoT-ratkaisujen ja digitaalisten kaksosten kehittämiseen. Se mahdollistaa reaaliaikaisen datan keräämisen, analysoinnin ja visualisoinnin, edistäen ennakoivaa huoltoa ja prosessien optimointia. ThingWorx puolestaan on PTC:n IoT-alusta, joka tarjoaa työkaluja digitaalisten kaksosten luomiseen ja hallintaan. Se yhdistää reaaliaikaisen datan, koneoppimisen ja älykkään analytiikan, mikä auttaa parantamaan tuotteiden suorituskykyä ja operatiivista tehokkuutta. MindSphere on Siemensin pilvipohjainen IoT-käyttöjärjestelmä, joka on erikoistunut datan keräämiseen ja analysointiin. Sen avulla voidaan luoda digitaalisia kaksosia, jotka auttavat ymmärtämään ja ennakoimaan laitteiden ja järjestelmien toimintaa. ANSYS on simulaatio-ohjelmisto, joka mahdollistaa monimutkaisten fysikaalisten ilmiöiden mallintamisen. Se on erittäin hyödyllinen digitaalisten kaksosten kehittämisessä, kun tarvitaan tarkkoja ennusteita ja analyysiä. Dassault 3D Experience on Dassault Systèmesin alusta, joka tarjoaa kattavan työkalusarjan tuotesuunnittelusta digitaalisiin kaksosiin. Se mahdollistaa monimutkaisten tuotteiden ja järjestelmien elinkaaren hallinnan virtuaaliympäristössä. Foxconn Beacon on ohjelmistoalusta, joka keskittyy älykkään valmistuksen ja teollisen IoT:n integrointiin. Se auttaa luomaan ja hallinnoimaan digitaalisia kaksosia teollisissa ympäristöissä, parantaen tuotannon tehokkuutta ja päätöksentekoa. MATLAB on numeeriseen laskentaan ja analyysiin tarkoitettu ohjelmistoympäristö, kun taas Simulink on mallinnukseen ja simulaatioon keskittyvä alusta.

Various Parts \ Comprehensive Tools		Predix	PTC's ThingWorx	Siemen's MindSphere	ANSYS	Dassault' 3D Experience	Foxconn's Beacon	MATLAB/Simulink
DT Evolution	Knowing the physical World				√	√		√
	Changing the physical world	√		√				
Modeling	Geometrical					√		√
	Physical				√	√		√
	Behavioral				√			
	Rule		√					√
DT Data Management	Data collection	√	√	√			√	
	Data transmission		√	√				
	Data storage		√			√	√	
	Data processing	√				√	√	√
	Data fusion	√				√	√	√
	Data visualization					√	√	
Services	Simulation services	√		√	√	√	√	√
	Optimization services	√		√			√	√
	Diagnosis and prognosis services	√	√	√	√		√	√
	Platform services	√	√	√		√	√	
Connection	Connection in digital world	√		√		√		
	Connection between digital and physical world	√	√	√		√	√	√

Kuva 3.2: Digitaalisen kaksoseen soveltuvia työkaluja ja niiden soveltuvuus kehityksen eri vaiheisiin. (Khan et al., 2022)

Yhdessä ne tarjoavat vahvat työkalut digitaalisen kaksosen suunnitteluun ja testaamiseen, erityisesti kompleksisissa teknisissä järjestelmissä.

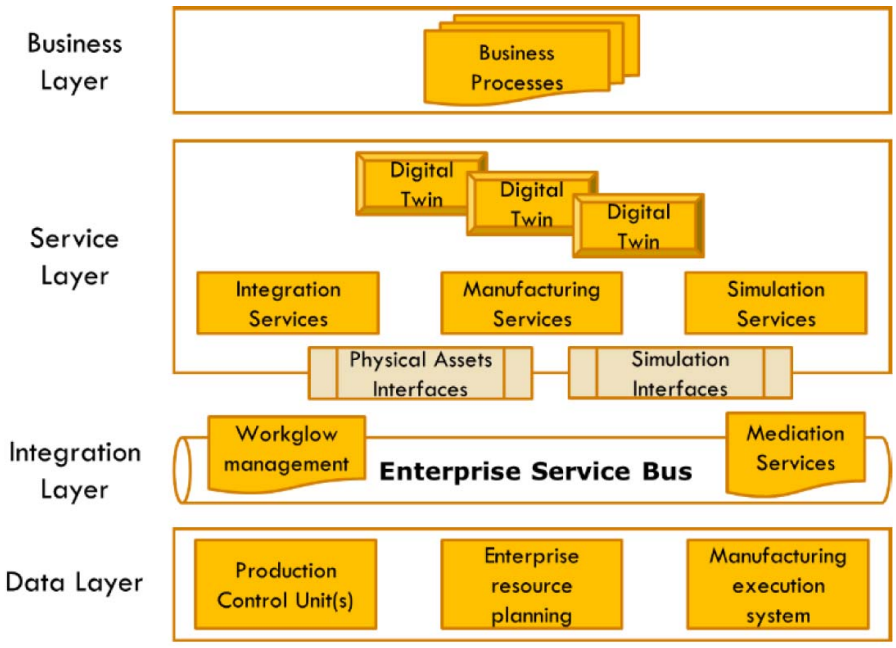
Vaikka taulukossa on mukana vain kattaviksi katsottuja DT-työkaluja, on silti nähtävissä, ettei yhdenkään työkalun ole arvioitu kattavan kaikkia vaiheita. Tämän johdosta työkaluja valitessa joudutaan valitsemaan sopiva työkalu eri vaiheisiin DT:een elinkaaressa. Esimerkiksi mallinnuksen vaiheessa, joka taulukossa on jaettu järjestelmän geometriseen, fyysiseen, sen käyttäytymisen sekä sen sääntöjen mallinnuksen osakokonaisuuksiin, ei yksikään työkalu kata näitä kaikkia osakokonaisuuksia tarjoamiensa ominaisuuksien kannalta. Mallinnusvaiheen alussa onkin olennaista löytää DT:lta haluttu mitattavat suureet ja mittatarkkuus sekä se mitä järjestelmän dynaamisia ominaisuuksia halutaan malliin sisällyttää. Näin voidaan saada parempi kuva siitä, mikä työkalu on soveltuvin.

Luku 4

Käsitteitä ja sovelluskohteita

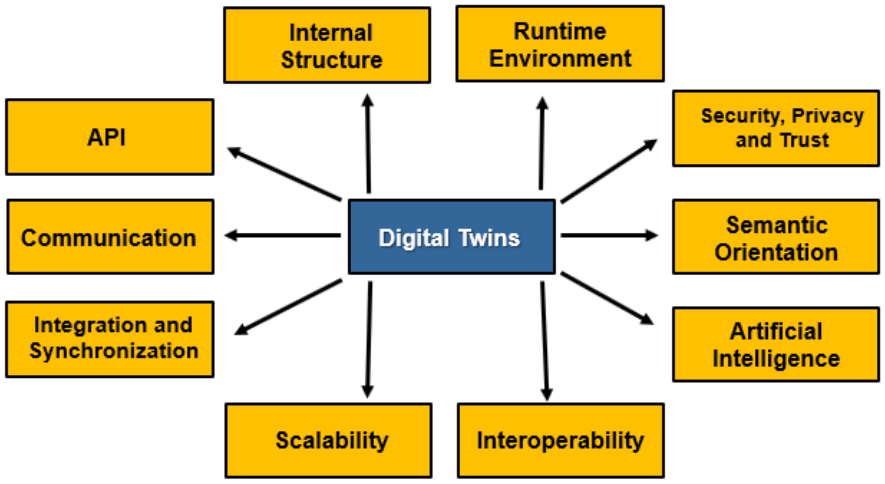
Tässä luvussa kuvataan keskeisimpiä digitaalisten kaksosten kehityksen mahdollistavia teknologioita ja ratkaisuja, sekä niihin liittyviä teknologisia konsepteja kuten Teollisuus 4.0 (eli Industry 4.0) ja Industrial Internet of Things (IIoT). Lisäksi esitellään DT-teknologioiden soveltamista eri alueilla.

Mihai et al. (2022) tarkastelevat artikkelissaan digitaalisten kaksosten kehitystä tukevia teknologioita, sekä niihin liittyviä haasteita, trendejä sekä tulevaisuuden näkymiä. Digitaalisten kaksosten kehitystä tukevina teknologioina listataan koneoppiminen, pilvi-, sumu-, ja reunalaskenta, IoT ja teollisuuden kontekstissa Industry 4.0 sekä IIoT, kyberfyysiset järjestelmät, virtuaali- ja lisätty todellisuus sekä mallinnuksen menetelmät. Näiden teknologioiden välistä yhteyttä esitellään Kuva 4.1:n avulla. Artikkelissa esitetyt digitaalisen kaksosen käyttökohteet sisältävät älykkäät tehtaat ja Industry 4.0:aan, infrastruktuurin (älykkäät rakennukset, älykäs infrastruktuuri, älykäs kaupunki), sekä 5G/6G:tä mahdollisuudet digitaalisten kaksosten toteutukselle. Suurin osa esitetyistä sovelluskohteista vaatii suuren määrän sensoreita ja runsaasti laskentatehoa ja oikein valittuja algoritmeja tämän niin kutsutun Big Datan suurien datamäärien käsittelyyn.



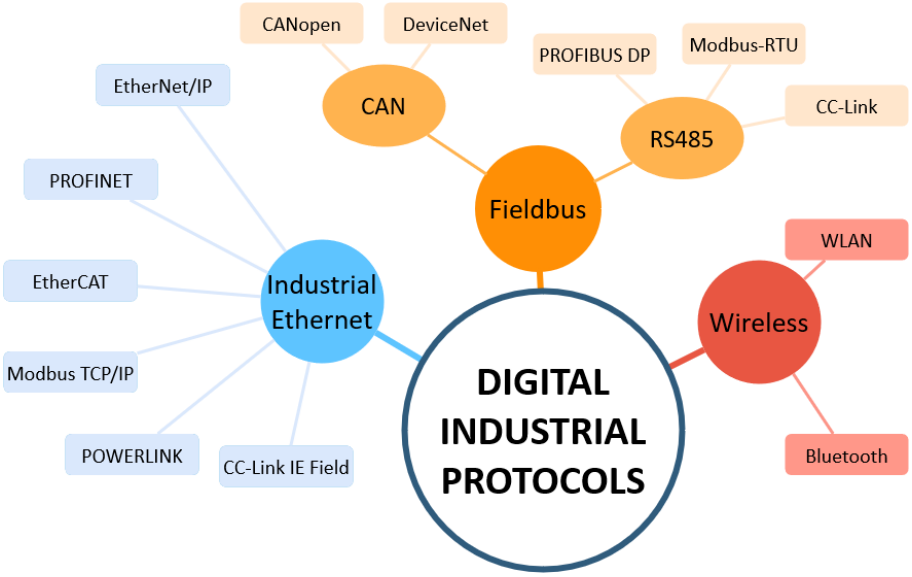
Kuva 4.1: Tyypillinen arkkitehtuuri IIoT-alustalle, jolla voidaan toteuttaa digitaalisia kaksosia. (Minerva et al., 2020)

Delfino et al. (2019) esittävät referenssiarkkitehtuurimallin digitaalisille kaksosille ja niiden ominaisuuksille, pohjautuen kirjallisuudesta löytyville käyttötapauksille ja niiden vaatimuksille. Kuva 4.2 esittää kyseisen arkkitehtuurimallin ja ominaisuudet.



Kuva 4.2: Digitaalisen kaksosen ominaisuuksia, joiden avulla referenssiarkkitehtuuri on määritelty. (Delfino et al., 2019)

Artikkelissaan Vuković et al. (2021) käsittelevät IIoT:n eli teollisen IoT:een digitaalisten kaksosten toteuttamiseen käytettäviä teknologioita. Artikkelissa korostetaan sitä, että tuotantolaitteiden on oltava kytkettävissä ohjausjärjestelmiin ja ulkoisiin järjestelmiin, kuten järjestelmästä digitaalisen kaksosen luoviin järjestelmiin.

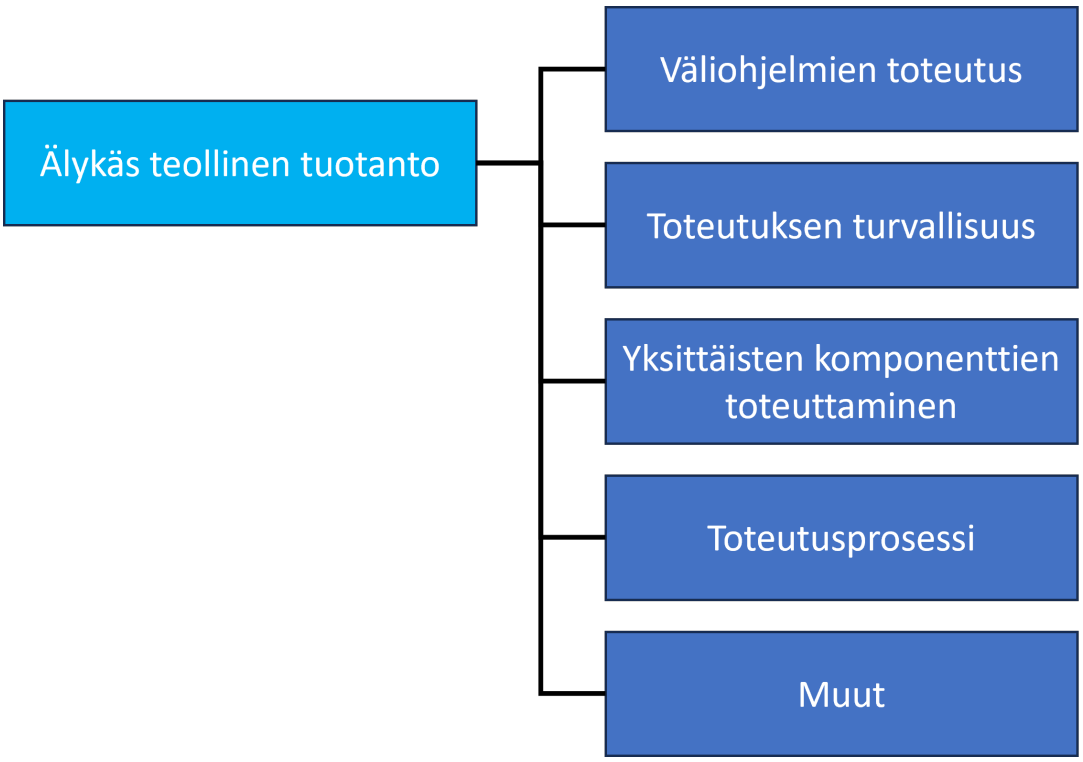


Kuva 4.3: Teollisuudessa käytettävien protokollien luokittelua. (Vuković et al., 2021)

Kuva 4.3 esittää protokollien jaon teolliseen Ethernetin, kenttäväylän ja langattomiin protokolliin. Artikkelin mukaan teollisen Ethernetin protokollien käyttö on lisääntynyt ja niiden käytön määrä (64%) ylittää jo kenttäväyläprotokollien käytön (n. 30%) ja vuodesta 2017 noin 6%:iin vakiintuneet langattomat protokollat.

4.1 Älykkään tuotannon tutkimusteemoja

Rüb ja Bahemia (2019) mukaan älykäs teollinen tuotanto on yksi tutkituimmista Industry 4.0:n ja IoT:een sovelluskohteista. Fuller et al. (2020) tutkimuksen mukaan suurin osa digitaalisen kaksosen tutkimuksesta on keskittynyt valmistusteollisuuteen, ja suurin osa digitaalisia kaksosia käsittelevästä kirjallisuudesta sekä tieteellisistä julkaisuista keskittyy nimenomaan valmistamiseen ja teolliseen tuotantoon. Kirjallisuuskatsauksessa käsittelemänsä älykkään teollisen tuotannon eri osien toteutuksen tutkimukset Rüb ja Bahemia (2019) jakoivat viiden teeman alle: väliohjelmien (middleware) toteutus, turvallisuuselementtien toteutus, yksittäisten komponenttien toteutus, toteutusprosessi, sekä "muut" (katso Kuva 4.4).

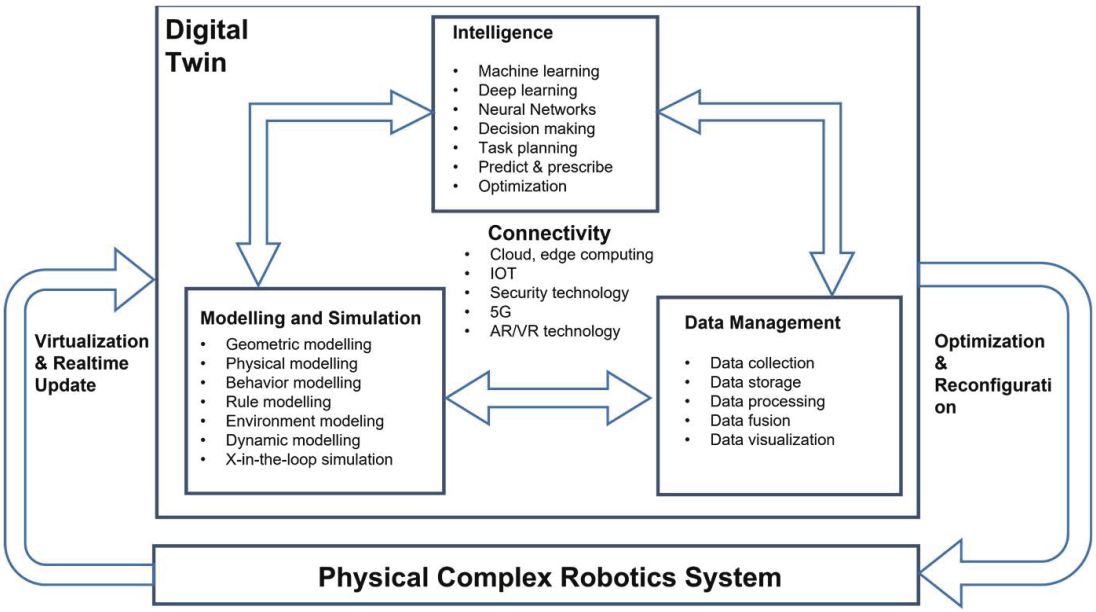


Kuva 4.4: Älykkään tuotannon kirjallisuuskatsauksen teemoja. (mukaillen lähdettä: Rüb ja Bahemia, 2019)

4.2 Robotiikka älykkäässä tuotannossa

Liang et al. (2022) tutkivat robotiikan käyttöä älykkäässä tuotannossa. Robotiikan järjestelmät voivat olla erittäin kompleksisia, jolloin niiden digitaalisten kaksostenkin kompleksisuus kasvaa vastaavasti, jotta järjestelmää voidaan kuvata riittävällä tarkkuudella. Kuva 4.5 esittää tutkijoiden luoman kaavion robotiikkajärjestelmän ja sen digitaalisen kaksosen komponenteista, keskeisistä käsitteistä ja datansiirrosta eri komponenttien välillä.

Kuvassa esiintyvät DT:een komponentit ovat mallinnus ja simulointi, "äly" (hyödyntää koneoppimista ja tekoälyä), datanhallinta sekä tietoliikenneyhteyksiä. DT:een komponentit saavat fyysisen kompleksisen robotiikkajärjestelmän lähettämää dataa reaaliaikaisina päivityksinä, ja saadun datan ja ennustemallien mukaisesti DT auttaa optimoimaan ja uudelleenkonfiguroimaan robotiikkajärjestelmää. Komponenttien tarkempaa roolia järjestelmässä käsitellään seuraavissa kappaleissa.



Kuva 4.5: Robotiikan digitaalisten kaksosten käyttöä ja teknologioita älykkäässä tuotannossa. (Liang et al., 2022)

Robotiikan sovelluksissa DT:een mallinnus ja simulointi komponentissa on esimerkiksi robotiikkaa hyödyntävän tuotantolinjan DT:ssä järjestelmän geometrian mallinnus on keskeisessä roolissa, sillä robotin ja sen ympäristön geometria vaikuttavat robotin toimintaan. Computer-aided Design (CAD)-ohjelmistoilla voidaan usein luoda vaatimuksia vastaava DT, jolla tuotantolinjaa voidaan simuloida.

Datanhallintakomponentissa DT:ssä on tyypillisesti suuret datankäsittelyn tehokkuusvaatimukset, jonka aiheuttavat datan kolme V:tä: Voluumi (datan määrä järjestelmässä), Vauhti (datan kertymisen nopeus), ja Vaihtelevuus (datan monimuotoisuus). Eri lähteistä tulevien vaihtelevien datojen yhdistäminen vaatii toimenpiteitä sekä datan että päätöksenteon tasoilla tehtävissä datafuusioissa. (He ja Bai, 2021)

"Äly"-komponentissa ovat järjestelmät ja ohjelmistot jotka ohjaavat päätöksentekoa ja optimisointia. DT:ssä nämä usein nykyään perustuvat tekoälyyn: koneoppimiseen, syväoppimiseen ja neuroverkkoihin. DT voi toimia myös virtuaalisena vastineena järjestelmälle, ja sen avulla voidaan kouluttaa tekoälymalleja.

Tietoliikenneyhteys-komponentissa on kerättynä ne teknologiat, joilla järjestelmän ja DT:een välinen tiedonkulku voidaan toteuttaa. Dataa DT:lle lähettävät tai tarjoavat komponentit voivat vaihdella IIoT-sensoreista pilvipalveluihin sijoitetuista palveluihin, jolloin tietoliikenteen järjestäminen niiden välillä on riippuvainen niiden toteutustekniikasta ja vaatii DT:een kehittäjiltä mukautumista muiden tekemiin valintoihin esimerkiksi tiedonsiirtoprotokollien suhteen.

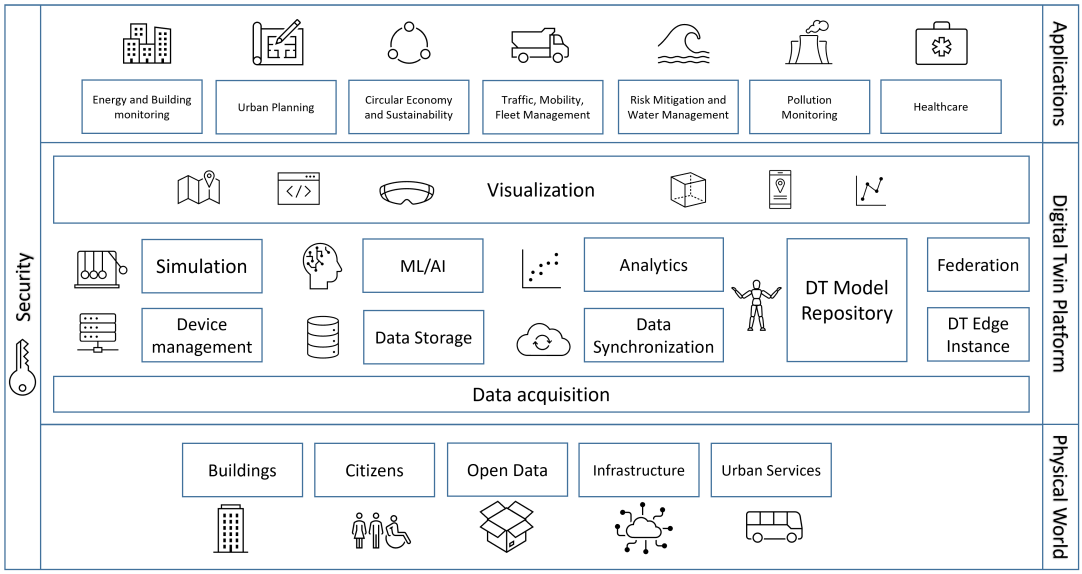
Ihekoronye et al. (2021) kuvaavat artikkelissaan IoT:een älykkäälle teollisuustuotannolle tarjoamia mahdollisuuksia, joista mainitaan suurempi energiatehokkuus, ennakoiva huolto, korkeampi tuotteiden laatu IoT-antureiden dataa käyttämällä, vähäisemmät tuotantokatkot sekä IoT-datan tukema päätöksenteko. Alan haasteina ja käytännön varautumista vaativina aiheina artikkeli nostaa esiin tiedonsiirron- ja tallennuksen, oikeellisuuden ja yhteistoimivuuden puutteellisuuden johtuen alan vaihtelevista käytännöistä ja puutteellisesta standardien hyödyntämisestä. Näistä seuraa se, ettei heterogeenistä IoT-dataa voida tehokkaasti kerätä tai analysoida. Yhtenä mahdollisuutena vähentää tätä haittaa on esitetty "transfer learning", koneoppimisen menetelmä, jossa aiempaa koulutusdataa ja malleja voidaan hyödyntää samankaltaisten ongelmien ratkaisemissa. Esimerkkinä "transfer learning" -menetelmän käytöstä on ollut hyötyä muun

muassa lääketieteellisessä radiologiassa, jossa lihassähkökäyrän (Electromyography (EMG)) datalla koulutettuja malleja on voitu hyödyntää aivosähkökäyriä (Electroencephalography (EEG)) tulkitessa.

Käytännön varautumista vaativina seikkoina DT:n soveltamisessa älykkääseen teollisuustuotantoon Ihekoronye et al. (2021) nostavat esiin DT:een modulaarisen toteuttamisen, virtuaalitodellisuuden (Virtual Reality (VR)) integroinnin DT:hen, simulointien toteuttamisen DT:llä, datanintegroinnin ja –turvallisuuden ja aiemmin mainittuun IoT-laitteiden luomaan heterogeeniseen Big Dataan. Käytännön digitaalisen kaksosen suunnitellussa ja toteutuksessa on mahdollisimman varhain varauduttava esitettyihin seikkoihin ja löydettävä niihin ratkaisut, jotta luotu digitaalinen kaksonen ja siihen liittyvät prosessit tiedonsiirtoineen vastaavat tarpeita.

4.3 Älykkäät kaupungit

Artikkelissaan, jossa tutkivat digitaalisten kaksosten hyödyntämistä älykaupungeissa hakien yhtymäkohtia digitaalisiin kaksosiin älykkäässä tuotannossa, Mylonas et al. (2021) korostavat IoT:een, koneoppimisen ja Big Datan kehittymisen ja kasvun merkitystä digitaalisien kaksosten teknologiapohjana. Tutkijat älykaupungin digitaalisen kaksosen kolmeen tasoon: fyysiseen, digitaalisen kaksosen alustan sekä sovelluksien tasoihin. Artikkelissaan he myös nostavat näiden kolmeen eri tasoon liittyviä komponentteja esiin. Näistä komponenteista muodostuu laajan tason toteutus ja toiminnallisuus (Kuva 4.6).



Kuva 4.6: Älykaupungin järjestelmien tasoja. (Mylonas et al., 2021)

Kuvasta 4.6 nähdään, miten esimerkiksi rakennus älykaupungissa on osa fyysisen maailman kerrosta. Rakennuksesta lähetettävää dataa käsitellään DT-alustan kerroksessa samoilla ohjelmistoilla ja työkaluilla kuin muidenkin fyysisen maailman esineiden lähettämä data. Sovelluskerroksessa on esimerkiksi rakennuksen ylläpidosta vastaaville ihmisille sovelluksia, jotka ovat räätälöity heidän tehtävänsä vaatimuksiin.

Kuva 4.7 esittää DT-alustoja ja -työkaluja ja niiden soveltuvuutta älykaupungin DT:n eri sovellusalueisiin. Listatut DT-alustat ja -työkalut kattavat sovellusalueita kaupunkisuunnittelusta kaupungin ilmansaasteiden tarkkailuun asti. Taulukko listaa myös esimerkkejä kaupungeista, joissa on käytetty DT-työkaluja. Esimerkiksi Kiinassa 51 City OS-POS on käytössä Shanghaissa energian, asumismukavuuden, rakennustenseurantaan sekä vesihuoltoon Yunnan

DT Project/City	Applications	Co-creation	IoT Data	Public UI	Status/Comment
NASA [113]	Asset & Risk Management	None/limited	Unclear	N/A	Mature, many years in operation
New South Wales DT [116]	Environmental/pollution/traffic monitoring, risk and water management, urban planning	Limited, city authorities	Traffic, air, flood	3D map, Web	Mature, in operation, publicly available, several application areas, large-scale
Virtual Singapore [114]	Urban planning, environmental monitoring, traffic	Limited, city authorities	Environmental, mobility via other projects	3D map	Mature, several application areas, large-scale
Herrenberg [102]	Urban planning, environmental and pollution monitoring	Yes, citizens & stakeholders	Noise, air, traffic	3D map, Web, VR	Pilot deployment / advanced research Prototype, focus on VR interfaces
DUET [117]	Urban planning	Yes, citizens & stakeholders	Traffic, air, noise	3D map, Web	Pilot deployment / Research Prototype
SPHERE [118]	Energy in buildings	None/limited	Energy, indoor environment, weather	N/A	Small-scale pilot deployment / Research Prototype
LEAD [88]	Last-mile logistics	Yes, multiple stakeholders	Mobility	N/A	Pilot deployment / Research Prototype
Dublin [125]	Urban planning	City authorities, Universities	None/limited	3D map	Demo Prototype
Zurich [105]	Urban planning, environmental and pollution monitoring	City authorities	Traffic, environmental, energy	3D map, Web, AR	Under active development. multiple applications built
Rotterdam [90], [121]	Port Management, energy, emergencies response	Limited, city/port authorities	Port traffic and environment, traffic, energy	3D map	Under development / Prototype
Antwerp [122]	Air & Noise Pollution, traffic monitoring, urban planning	Limited, city authorities	Air, noise, traffic	3D map, Web	Prototype
Helsinki [123], [124]	Tourism, urban planning	Yes, other smart city projects	None/limited	3D map, Web, VR	Prototype
Boston [129]	Urban Planning	Limited	None/limited	3D map	Under development
Shanghai [127]	Urban Planning	None/limited	None/limited	3D map	City-scale prototype
Amaravati	Urban Planning	Led by local government	Unclear status	N/A	Unclear status
Wellington [130]	Urban Planning, traffic monitoring	Limited	Land & air traffic, parking	3D map, Web	Prototype

Kuva 4.7: Saatavilla olevia digitaalisen kaksosen toteutuksen ja suunnittelun työkaluja älykaupungin kontekstissa. (Mylonas et al., 2021)

maankunnassa. Helsingissä on käytetty Bentley Systemsin työkaluja: Bentley iTwin-alustaa sekä ContextCapture- ja OpenCities Planner- mallinnustyökaluja kaupunkisuunnittelussa.

4.4 Rakennusalan digitaaliset kaksoset

Godager et al. (2021) esittävät digitaaliset kaksoset vallankumouksellisena tapana integroida ja hallita rakennettuja varoja niiden koko elinkaaren ajan. Heidän tutkimuksiensa perusteella Architecture, Engineering, Construction, and Operations (AECO)-teollisuudessa käsite ei kuitenkaan ole täysin ymmärretty, ja terminologian käytössä on eroavaisuuksia lähteistä riippuen.

Rakennusten DT:t mahdollistavat laajemman käsityksen rakennetusta ympäristöstä, hyödyntäen rakennusten eri elinkaaren vaiheista luotuja tietokonemalleja. Digitaalisten kaksosten keskeinen tehtävä on helpottaa rakennustietojen kattavaa uudelleenkäyttöä, mahdollistaen erilaisten simulointien (esim. tilojen käyttö, sisä- ja ulko-olosuhteet, energiankäyttö) toteuttamisen. Digitaalinen kaksonen voi mallintaa ihmisten vuorovaikutusta rakennetun ympäristön kanssa reaaliajassa yhdistämällä Building Information Modeling (BIM):n, IoT:n, tekoälyn ja digitaalisen seurannan. Lisäksi kaksoset tarjoavat tietoalustan nykyisten ja historiallisten ominaisuuksien, tilojen, vuorovaikutusten ja erilaisten reaaliaikaisten rekisteröintien arvioimiseen. BIM- ja tuotetietojen integroinnilla digitaaliseen kaksoseen voidaan saavuttaa hyötyjä sekä rakennus-, suunnittelu-, toteutus- että ylläpitovaiheessa (Operations & Managements (O&M)).

Godager et al. (2021) mukaan rakennusten DT-järjestelmillä voi olla erilaisia tarkoituksia ja ne on toteutettava alakohtaisesti, mutta niillä on tyypillisesti seuraavia ominaisuuksia:

1. päivitetty 3D-geometria, mukaan lukien materiaalit ja attribuutit
2. liitettävyys objektien/staattisen datan yhdistämiseksi

3. liitettävyys antureihin, jotka käyttävät sisätilojen paikannus- sekä navigointijärjestelmiä ja tuottavat suoratoistodataa
4. laskenta- ja analysointivalmiudet
5. tietojenhallintajärjestelmät sekä niihin liittyvät tietorakenteet
6. käyttöliittymät sovelluksille, jotka yhdistävät mm. visualisoinnin ja ihmisten välisen vuorovaikutuksen

Godager et al. (2021) näkemyksen mukaan BIM-järjestelmien ja digitaalisten kaksosten yhdistämisessä voidaan nähdä paljon potentiaalia, mutta vakiintuneiden käytäntöjen ja toimintamallien kehittämiseen tulisi panostaa enemmän.

4.5 Terveydenhuolto

Khan et al. (2022) huomauttaa, että nopea väestönkasvu on jo aiheuttanut valtavan rasituksen nykyisille terveydenhuoltoresursseille. Tarvitaan siis uutta teknologiaa, joka auttaa nopeiden, tarkkojen ja taloudellisten ratkaisujen löytämisessä lääketieteellisiin hätätilanteisiin, diagnooseihin ja toimenpiteisiin. Älykäs terveydenhuolto voi valistaa ihmisiä heidän terveydentilastaan ja antaa heille myös mahdollisuuden hoitaa joitakin sairauksiaan itse. Terveydenhuollon digitaaliset kaksoset ovat kuitenkin monimutkaisia järjestelmiä, joiden toteuttamiseen vaaditaan tuntemusta muun muassa lääketieteestä, mikroelektroniikasta, terveydenhuoltojärjestelmistä sekä tekoälystä. Teoriassa digitaaliset kaksoset voisivat mahdollistaa potilaiden etävalvonnan sairaaloissa ja kodeissa, ja niiden tavoitteena voidaankin pitää terveydenhuollon laadun parantamista, hätätilanteiden ehkäisyä ja hallintaa sekä terveydenhuollon kustannusten laskemista.

Fuller et al. (2020) käsittelee kirjallisuustutkimuksessaan avoimia tutkimuskysymyksiä digitaalisten kaksostenteknologian osalta terveydenhuollossa. Heidän löydöksiensä mukaan yksi potentiaalisimmista tutkimuskohteista on DT-tekniikan soveltaminen ihmisiin. Esimerkkinä he mainitsevat henkilön digitaalisen kaksoisolennon, joka seuraa päivittäistä terveyttä ja hyvinvointia tarjoten mahdollisuuden simuloida, miten positiiviset ja negatiiviset elämäntapamuutokset voisivat vaikuttaa fyysiseen ihmiseen ja tämän hyvinvointiin. Yhdistämällä historiallista ja reaaliaikaista tietoa digitaaliseen kaksoseen voidaan tunnistaa terveydellisiä riskejä ja täten parantaa ennaltaehkäisevää hoitoa sekä tehostaa jatkotoimenpiteitä. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan myös simuloida lääketieteellisiä operaatioita (esim. leikkauksia) ja näiden vaikutuksia. Tutkimus tuo myös esiin mahdollisuuden kauko-ohjatun kirurgian ja terveydenhuollon toteuttamisesta – tulevaisuudessa siis lääkäri voisi suorittaa myös monimutkaisempia toimenpiteitä etänä tai robottien avustamana.

Merkittävä avoin tutkimus heidän mukaansa liittyy ihmiskehon mallintamiseen, ja suurimpana ongelmana nähdään puutteelliset standardoidut mallintamismenetelmät. Haasteena nähdään myös käsiteltävä tieto, mikä koostuu potilastiedoista sekä muusta henkilökohtaisesta datasta. Järjestelmien integraatiossa on siis syytä erityisesti huomioida tiedon välittämiseen, taltioimiseen ja käsittelyyn liittyvät yksityisyysseikat. Khan et al. (2022) mainitsee, että digitaalisten mallien avulla aloittelevat lääkärit ja kirurgit voivat harjoitella työtehtäviään turvallisessa ympäristössä, mutta kirjoittajat nostavat Fuller et al. (2020) tavoin esiin tekniikkaan, yksityisyyteen ja eettisiin seikkoihin liittyvät ongelmat.

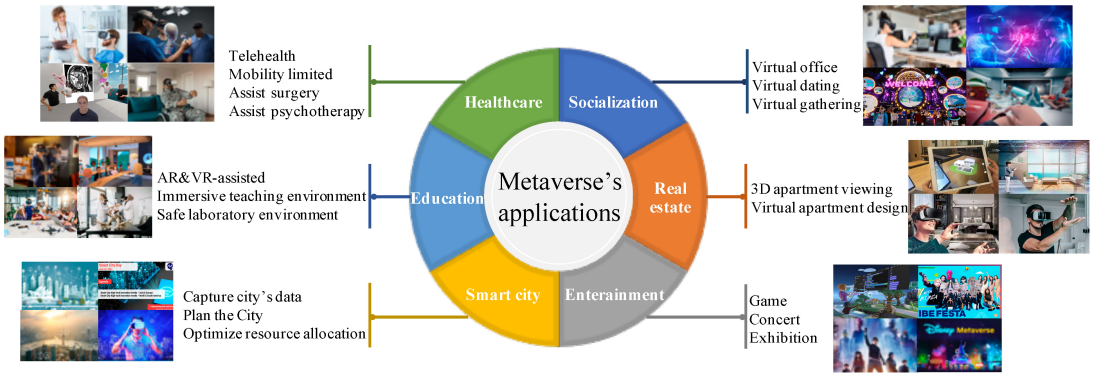
Monet terveydenhuollon sovellukset eivät koske suoraan potilasta, mutta niistä on hyötyä jatkuvalle hoidolle ja hoivalle, ja siksi tällaisilla järjestelmillä on keskeinen rooli potilaan hoidossa. Terveydenhuollossa digitaalisten kaksosten hyödyntäminen on vasta alkuvaiheessa, mutta potentiaaliset käyttökohteet ovat merkittävät.

Kyky simuloida ja toimia reaaliaikaisesti on terveydenhuollossa entistäkin tärkeämpää, sillä se voi olla elämän ja kuoleman välinen ero. Digitaalinen kaksonen voisi auttaa myös ennakoivassa

kunnossapidossa ja lääkinnällisten laitteiden jatkuvassa ylläpidossa. Digitaalinen kaksonen voisi lääketieteellisessä ympäristössä yhdessä tekoälyn kanssa auttaa päätöksenteossa reaaliaikaisten ja historiallisten tietojen perusteella.

4.6 Metaverse

Metaverse tavoittelee kolmiulotteisten virtuaalimaailmojen ja fyysisten maailmojen integroitua verkkoa, jossa julkinen Internet on laajennettu tarjoamaan käyttäjille niin kutsuttuja kybervirtuaalisia kokemuksia. Lisätyn todellisuuden (Augmented Reality (AR)) ja virtuaalitodellisuuden (VR) kehityksen on nähty mahdollistavan metaversumin käyttäjille yhdistettyjä immersiivisiä digitaalisia kokemuksia ja sosiaalisia yhteyksiä. K. Li et al. (2023) listaa terveydenhuollon, koulutuksen, älykaupungit, viihteen, kiinteistöjenhallinnan ja sosiaalisen kanssakäynnin Metaversen tyypillisiksi käyttökohteiksi, ja nämä kohteet ovat havainnollistettuna kuvassa 4.8.



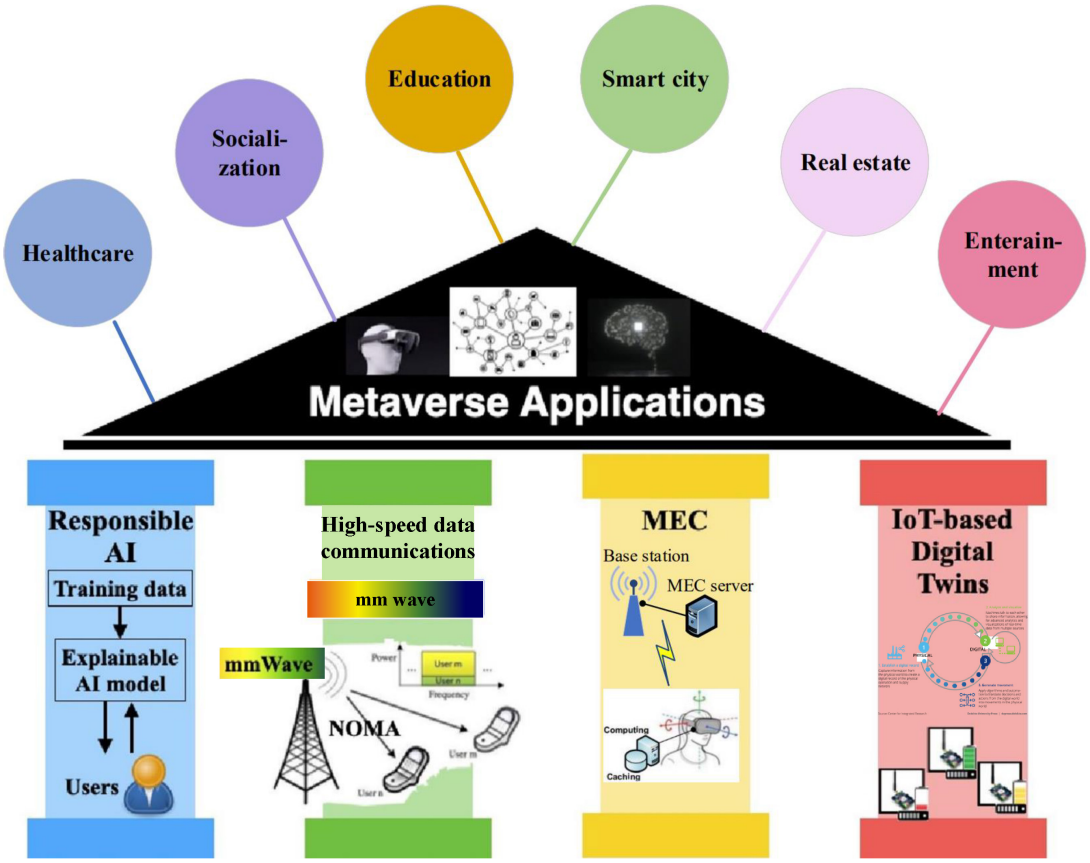
Kuva 4.8: Metaversen tyypillisiä käyttökohteita. (K. Li et al., 2023)

Digitaaliset kaksoset ovat K. Li et al. (2023) mukaan yksi Metaversen neljästä peruspilarista. Kolme muuta ovat tekoäly, nopeat tietoliikenneyhteydet sekä Multi-access Edge Computing (MEC), josta toisinaan käytetään myös muotoa Mobile Edge Computing. Nämä pilarit on esitetty kuvassa 4.9.

Digitaaliset kaksoset luovat virtuaalisen kopion fyysisistä esineistä tai palveluista, kuten rakennusten tiloista, toimintaprosesseista, ihmisen ja tietokoneen vuorovaikutuksesta tai sosiaalipalveluista. Metaversessä digitaalisia kaksosia käytetään tyypillisesti tarjoamaan immersiivinen ostokokemus. Digitaalisten jäljennösten yhdistäminen fyysisiin tuotteisiin ja palveluihin voi myös tukea data-analytiikkaa, jolloin voidaan simuloida fyysisen maailman skenaarioita ennen kalliiden hankintapäätösten tekemistä. Fyysisen maailman entiteettien digitaalisina kuvauksina digitaaliset kaksoset voivat synkronoida omaisuuseriä, prosesseja ja käyttöjärjestelmiä reaalimaailman ja jokapäiväisten toimien, kuten visualisoinnin, analyysin ja ennustamisen kanssa. Digitaaliset kaksoset ovat keskeisiä siinä, miten fyysinen ja virtuaalinen maailma ovat vuorovaikutuksessa IoT-yhteyksien kautta.

Digitaaliset kaksoset voisivat siis olla yksi Metaversumin perusrakennuspalikoista, jotka luovat fyysisen maailman jäljennöksiä rakenteista ja toiminnoista, ja toimivat portteina, joiden kautta käyttäjät voivat käyttää ja nauttia virtuaalipalveluista. Esimerkiksi insinööri voisi luoda kolmiulotteisen esityksen monimutkaisesta järjestelmästä eri tasoilla (kuvaileva, informatiivinen, ennakoiva, kokonaisvaltainen ja itsenäinen) eri toimintoja varten. Digitaalisten kaksosten avulla insinöörit ja palveluntarjoajat voivat kloonata koneiden ja prosessien virtuaalisia objekteja ja suorittaa fyysisiä analyyseja etänä esimerkiksi tekoälyn avulla.

Digitaalisten kaksosten laajamittaisen Metaversessa hyödyntämisen ja käyttöönoton tiellä on kuitenkin vielä haasteita. Kolmeksi pääasialliseksi haasteeksi K. Li et al. (2023) mainitsee:



Kuva 4.9: Metaversen sovellusalueita ja sen neljä peruspilaria. (K. Li et al., 2023)

Rajallinen data Käytännössä antureiden määrä on usein riittämätön ja digitalisaation prosessit ovat edelleen käynnissä, reaaliaikaista dataa on saatavilla rajallisesti. Täten digitaaliset kaksoset eivät vielä ole käyttökelpoisia työkaluja kaikilla alueilla. Puutteellinen määrä antureita (ja anturityyppejä) vaikeuttaa tarkan digitaalisten kaksosten esittämistä.

Epäjohdonmukaiset tai yhteensopimattomat tietomuodot IoT-laitteista kerätyt tiedot tallennetaan, käsitellään ja esitetään moninaisissa muodoissa, minkä vuoksi niitä on vaikea integroida digitaalisten kaksosten data-alustoihin.

Avoimuus ja turvallisuus Suuri osa fyysisistä omaisuuksista edellyttää korkeaa turvallisuus- ja turvatasoa, ja tästä johtuen digitaalisten kaksosten perusteella tehtyjen päätösten läpinäkyvyydessä ja tulkittavuudessa on parannettavaa.

Metaversessa digitaalisia kaksosia käytetään koko tuotekehityksen elinkaaren ajan suunnittelusta tuotannon jälkeiseen seurantaan ja huoltoon tuottavuuden ja kannattavuuden parantamiseksi. Ideointivaiheessa digitaalisia kaksosia voidaan käyttää virtuaalisten prototyyppien rakentamiseen sekä suorituskyvyn arviointiin. Kehittämisen aikana digitaalisia kaksosia voidaan käyttää parantamaan kehitysprosessia esimerkiksi prosessien optimoinnilla, laitteiden etädiagnostiikalla ja toimitusten hallinnalla. Täten digitaaliset kaksoset voivat siis auttaa esimerkiksi tunnistamaan mahdollisia vikoja, ja lopulta parantamaan asiakastyytyväisyyttä. Toimitusketjun optimoinnissa tuotannon ajoitusta ja toimitusreittejä voidaan optimoida digitaalisten kaksosten avulla. Digitaalisia kaksosia säätämällä voidaan löytää uusia menetelmiä tuotannon optimoimiseksi, vähentää vaihtelua ja auttaa ongelmatilanteiden syiden analysoinnissa. Digitaalisia kaksosia voidaan käyttää myös tuotteiden myöhemmissä vaiheissa, kuten kustannusten vähentämisessä, ennakoivassa kunnossapidossa ja palvelun parantamisessa. Kun Metaversumi-tuotteita

kaupallistetaan, digitaaliset kaksoset voivat kerätä käyttäjätietoja ajan mittaan, jotta saadaan tietoa tuotteen suorituskyvystä ja palvelukokemuksesta. Nämä tiedot voivat auttaa suunnittelijoita ja kehittäjiä parantamaan asiakaskokemusta esimerkiksi räätälöityjen palvelujen avulla. (Malik ja Bilberg, 2018; Schleich et al., 2017; Boschert ja Rosen, 2016; Kenett ja Bortman, 2022)

4.7 Tekoäly ja koneoppiminen digitaalisissa kaksosissa

Artikkeli Ratnayake et al. (2020) käsittelee yhdessä kolmea eri konseptia: DT, koneoppiminen ja IoT. Tässä yhteydessä DT kuvataan fyysisen esineen, laitteen tai järjestelmän virtuaalista mallia, joka simuloi sen todellista vastinetta.

Koneoppiminen (Machine Learning) DT sisältää syväoppimisen (Deep Learning (DL)) käsitteitä. Kuvien, videoiden, tekstin ja puheen prosessointia käytetään antureiden numeeristen lukemien ohella. Teksti mainitsee myös erilaisia neuroverkkoja, kuten konvoluutioverkot (Convolutional Neural Networks (CNN)) ja rekurrenttiverkot (Recurrent Neural Network (RNN)), jotka mahdollistavat digitaalisten kaksosten analysoinnin ja ennustavien tietojen tuottamisen.

Internet of Things (IoT) IoT:n avulla fyysiset esineet voidaan liittää verkostoihin ja niistä voidaan kerätä dataa. Tämä on olennainen osa digitaalista kaksosta, sillä se riippuu siitä, miten paljon dataa se voi kerätä. Tekstin mukaan digitaalinen kaksonen on datankeruun, arvioinnin ja palautteen sykli, joka korostaa sen toiminnan riippuvuutta kerättävistä tiedoista. IoT:n avulla kerätään ja analysoidaan dataa, joka muodostaa IoT-ekosysteemin.

Nämä kolme konseptia voidaan yhdistää ja tulokseksi saadaan:

- IoT on ensisijaisesti vastuussa reaaliaikaisen datan keräämisestä fyysisistä esineistä.
- Tämä data analysoidaan ja prosessoidaan käyttäen koneoppimisen menetelmiä, kuten konvoluutiota ja rekurrenttiverkkoja, jotka tuottavat syvällisiä analyysejä ja ennusteita.
- Digitaalinen kaksonen toimii tämän datan pohjalta, simuloiden fyysisen kohteen toimintaa ja mahdollisesti ennustaen sen tulevaa käyttäytymistä.

Kaikki nämä toiminnot ovat yhteydessä pilvipalveluihin, jotka tarjoavat tallennustilaa, laskentaa ja viestintää.

Datan saatavuus ja sen asianmukainen hyödyntäminen ovat keskeisiä digitaalisten kaksosten kehittämisessä. Big Data -teknologioilla voidaan hallita dataa, jota järjestelmälle Digitaalinen kaksonen + koneoppiminen + IoT tarjotaan. Artikkeli paneutuu lisäksi tarkemmin koneoppimisen algoritmeihin, joita edellä mainituissa tapauksissa voidaan hyödyntää. (Ratnayake et al., 2020)

Artikkelissa Kumar et al. (2021) yhdistetään tekoäly Industry 4.0 ja Smart City konsepteihin (katso Kuva 4.10)

Tutkimuspaperissa mainitaan, että digitaalinen kaksonen (DT) voi tuoda ratkaisuja seuraaviin ongelmiin:

Koneiden älykkyys ja luotettavuus Koneiden monitorointi internetin kautta voi olla haastavaa. Industry 4.0 pyrkii tekemään koneista älykkäämpiä ja luotettavampia. Tässä yhteydessä digitaalinen kaksonen tarjoaa mahdollisuuden parantaa koneiden älykkyyttä ja luotettavuutta, koska se luo tarkan mallin fyysisestä laitteesta tai prosessista. Tämä malli voi simuloida ja ennustaa laitteen käyttäytymistä eri olosuhteissa, mikä auttaa ymmärtämään ja ennakoimaan laitteen toimintaa ja mahdollisia ongelmia.



Kuva 4.10: SmartCity-konsepteja Industry 4.0 -teemassa. (Kumar et al., 2021)

Ylläpidon ennustaminen Digitaalinen kaksonen luo mallin käyttämällä fyysistä omaisuutta ennustaakseen ylläpitoa. Tämä tarkoittaa, että digitaalinen kaksonen voi auttaa ylläpitohenkilöstöä tunnistamaan mahdolliset ongelmat ennen kuin ne ilmenevät. Se voi esimerkiksi ennakoida, milloin tietty komponentti saattaa hajota tai milloin huolto on tarpeen. Tämä voi johtaa siihen, että vältetään kalliit ja odottamattomat korjaukset sekä tuotannon keskeytykset.

Tuotteen toiminnallisen ja fyysisen kuvauksen mallintaminen Digitaalinen kaksonen tarjoaa sekä toiminnallisen että fyysisen kuvauksen tuotteesta. Tämä auttaa suunnittelijoita, insinöörejä ja muita sidosryhmiä ymmärtämään tuotteen tai järjestelmän toimintaa syvällisesti, mikä voi auttaa optimoimaan suunnittelua, parantamaan suorituskykyä ja reagoimaan tehokkaasti ongelmiin.

Näiden edellä mainittujen ratkaisujen avulla digitaalinen kaksonen voi merkittävästi parantaa teollisuuden toimintoja, tehokkuutta ja luotettavuutta. (Kumar et al., 2021)

4.8 Tietoturva ja muut turvallisuus näkökulmat

Tutkimuspaperi Buja et al. (2022) kokoaa yhteen systemaattisen kirjallisuuskatsauksen metodein IIoT:n liittyvien kyber-tietoturvallisuuden standardeja. IIoT on osa Industry 4.0:n, eli neljännen teollisen vallankumouksen, kontekstia. Tässä roolissa sillä merkittävä vaikutus kyberfyysisten järjestelmien sekä tuotantoprosessien muuntautumisesta big datan käyttöönottoon. Kirjalli-

suuskatsaus on toteutettu siten, että sillä on saatu kerättyä tietoa IIoT:sta, kyberturvallisuuden vastatoimista, sekä turvallisuuskäytännöistä.

Kirjallisuuskatsauksen hakuterminä oli `(("Industrial IOT" AND "Cyber Security" AND "Internet of things"))` muotoinen lauseke neljässä eri julkaisutietokannassa. Hakutulosten seulonnan perusteella löytyi 47 sopivaa tutkimusjulkaisua. Yhteenvetona julkaisussa todetaan, että IIoT on avannut uusia mahdollisuuksia kyberturvallisuusratkaisuille tullakseen laajalti käytetyiksi teollisuudessa, ja osoitettu, että kyberturvallisuusstandardien mallia voidaan soveltaa IIoT-ympäristössä uhkien ja kyberhyökkäysten estämiseksi. Artikkelin mukaan tulokset osoittavat, että IIoT-järjestelmät ovat alttiita tietoturvariskeille ottaen huomioon tietojen käsittelyn, säilyttämisen ja siirtämisen. IIoT:n kaltaiset uudet teknologiat tarjoavat joitakin hyödyllisiä ratkaisuja, mutta niillä on omat rajoituksensa, mikäli otetaan huomioon proaktiivinen (kuten tunnistaminen ja ennaltaehkäisy) lähestymistapa kyberturvallisuudessa. Näiden rajoitteiden ratkaisuun pelkät perinteiset keinot eivät ole täysin riittäviä.

Julkaisussa Mullet et al. (2021) käsitellään varsin kattavasti tietoturvallisuuden suuntaviivoituksia valmistavalle teollisuudelle Industry 4.0:n kontekstissa. Kyberturvallisuuteen liittyvät erilaiset standardit ja parhaat käytänteet käydään seikkaperäisesti läpi mm. seuraavissa asiayhteyksissä:

- kyberturvallisuuden karakterisointi ja luokittelu
- kyberturvallisuuden rajat ja kerrostuneisuus tehtaissa
- tehtaiden kohtaamat haavoittuvuudet, riskit, uhat ja liiketoimintavaikutukset
- kyberturvallisuusratkaisuja tehtaille
- kyberturvallisuuden ohjeistuksia tehtaille

Kyberturvallisuuden ja valmistavan teollisuuden osalta mainitaan kaksi tärkeintä standardia: ISO/IEC 27002 sekä ISO/IEC 27017. Myös yhdysvaltalaisen standardointiorganisaation (National Institute of Standards and Technology (NIST)) kehittämä kehikko (NIST Framework) mainitaan. Standardeista mainitaan, että ne ovat käyttökelpoisia myös kyberturvallisuusstrategioiden alkuun saattamisessa. Kyberturvallisuus ei ole pelkästään tekninen seikka tai IT-osaston asia, vaan sen tulisi kulkea koko organisaation läpi, jotta turvallisuusriskeistä oltaisiin tietoisia kaikkien toimijoiden kesken.

Anda et al. (2021) pohtii digitaalisen kaksosen osaa neljännen teollisen vallankumouksen eräänä kulmakivistä. Digitaalinen kaksonen on vahvasti kehittyvässä tilassa, mutta sen tuottamia tuloksia käytetään jo merkittävien taloudellisten ja tuotannollisten päätösten tekoon. Siksi tietojen luotettavuus, turvallisuus, ja suojautuminen ovat tärkeitä tekijöitä digitaalisten kaksosten maturiteetin kannalta. Paperin erityisteemaksi on otettu suojautuminen ja tietoturvallisuus öljy- ja kaasuteollisuuden aloilla. Sensoriverkkojen lähettämää dataa kuvataan neljässä erilaisessa kommunikaatiotapauksessa fyysisen tiedonsiirtolinjan näkökulmasta. Työssä myös pohditaan eri salausmenelmien käyttöä ja suorituskykyä.

Julkaisu Reeves ja Maple (2019) lupaa käsitellä digitaalisten kaksosten konseptin alkuvaiheiden sekä artikkelin kirjoitushetken kehitystä mm. turvallisuushaasteiden, luotettavuuden, sekä konseptin tarjoamien uusien bisnesmahdollisuuksien osalta. Käytännössä kuitenkin haasteiden osalta tunnistettiin sidosryhmien kanssa pidetyissä työpajoissa 14 erilaista tapausta:

- Kaupallisuus ja sopimusperustainen
    1. Arvot
    2. Hankinnat

3. Kaupalliset mallit

- Turvallisuus, taidot, käyttäytyminen
  1. Terveys ja turvallisuus
  2. Käyttäytyminen ja taidot
  3. Uudet kyvyt
- Konseptit ja rakenteet
  1. Määritelmät, konseptit
  2. Prosessit
  3. Hallinto
- Data, analytiikka ja suojatoimet
  1. Datan omistajuus
  2. Suunnitteluun perustuva suojautuminen
  3. Analytiikka, tekoäly
  4. Data, mallit ja ontologiat
  5. Käyttöliittymät ja rajapinnat

Digitaalisten kaksosten onnistuminen ylimääräisten piilokustannusten välttämiseksi vaatii riittävää keskittymistä käytettävissä olevan data-arkkitehtuurin laadukkuuteen. Yhteistyön ja konsensuksen puute organisaatioiden välillä vaikuttavat negatiivisesti digitaalisiin kaksosiin liittyvien ohjelmien onnistumiseen.

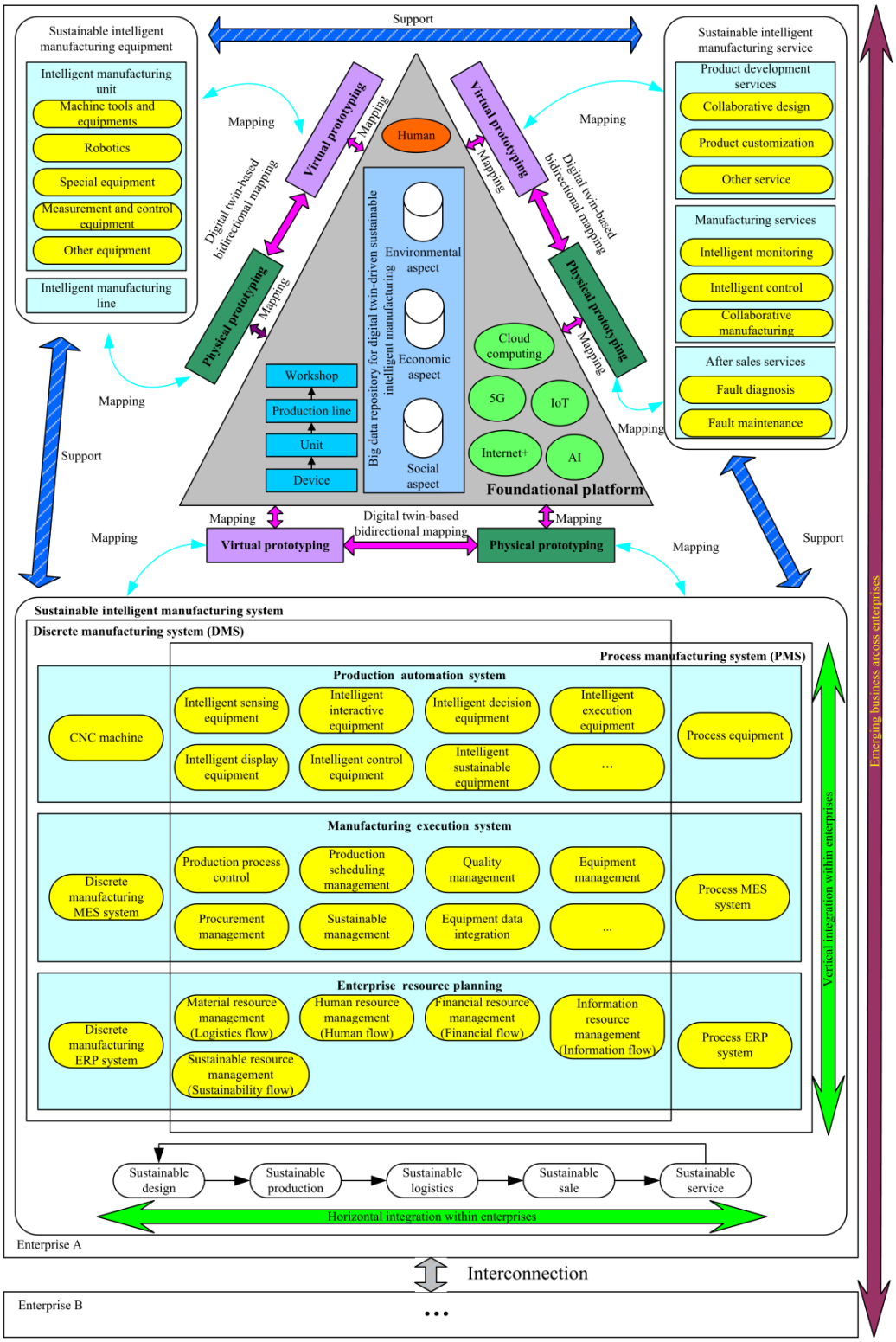
4.9 Digitaalinen kaksonen kestävässä kehityksessä

Kestävän kehityksen alan teemoja tutkitaan maailmalla laajalti, ja digitaalisen kaksosen teknologioilla on oma osansa tutkimuksessa. Intiassa tehdyssä tutkimuksessa (Leo Joseph et al., 2022) etsittiin systemaattisen kirjallisuuskatsauksen vertaisarvioinnin avulla julkaisuja, joissa käsitellään digitaalisen kaksosen käyttöä kestävyyden näkökulmasta. Parhaiten kestävyyttä käsitteleviä sisältöjen yhteyksiä tunnistettiin tutkimuksen mukaan seuraaviin aiheisiin:

Tuoteturvallisuus jos jokin tuotteen osa todetaan vaaralliseksi, ei tuotetta voi käyttää turvallisesti. Digitaalisen kaksosen avulla testaaminen on nopeampaa kuin fyysisellä tuotantokappaleella testaaminen.

Energiatehokkuus energian ja siitä syntyvien kulujen hallinta energian käyttöön liittyviä ennakointimalleja hyödyntäen. Energian kulutusta voidaan hallinnoida ja tasapainottaa ympäristöä huomioimalla hyödyntämällä uutta teknologiaa.

Digitaaliseen kaksoseen perustuva kestävän kehityksen älykästä tuotantoa käsittelevässä artikkelissaaan He ja Bai (2021) tuovat esiin älykkään tuotannon eri osa-alueita ja luovat ehdotuksen kehyksestä, jossa DT on osana ja ohjaa tuotantoa. Kuva 4.11 antanee vinkin siitä kuinka laajasta asiasta voi olla kyse.



Kuva 4.11: Digitaalisen kaksosiin perustuvan kestävän älykkään valmistuksen kehikko. (He ja Bai, 2021)

Yksi tutkimusteemoista kestävän kehityksen alueella on digitaalisen kaksosen käyttöä tuotteiden elinkaaren ja päästöjen mittaamisessa. Digitaalisella kaksosella luotavaa kestävän kehityksen arviointimenetelmää käsitellään artikkelissa L. Li et al. (2020), jossa esitellään Sustainability Assessment of Intelligent Manufacturing (SAoIM)-prosessin kehys, joka tarjoaa informaatioark-

kitehtuurin tuotannon elinkaaren kattamiseksi. Artikkelissaan Barni et al. (2018) tutkivat digitaalisen kaksosen teknologioiden roolia tuotannon tai tuotteiden elinkaareen liittyvän hiilijalanjäljen arvioinnissa. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa tuotannon tai tuotteiden elinkaareen liittyvän hiilijalanjäljen arvioinnin luovat ehdotuksen kehyksestä, jossa digitaalinen kaksonen toimii yhteistyössä järjestelmän ja tiedonkeruun kanssa ja antaa käyttäjälleen päätöksen tueksi tarvittavaa tietoa kokonaisuudesta.

4.10 Digitaalinen kaksonen osana kuluttajien IoT:tä

Korealaisen yliopiston tutkimuksessa katsotaan yhtä IoT:n laajaa sisällön osa-aluetta, joka koskee kuluttajien IoT:ta (Consumer IoT (CIoT)). CIoT:ssa korostuu käyttäjän arkea helpottavat ratkaisut. Esimerkkinä voidaan mainita älytalo-kokonaisuus (Kuva 4.12), ja siellä erilaisten laitteiden kanssa kommunikointi.



Kuva 4.12: Kuluttajien IoT -ratkaisuja (CIoT) älytalon asumiskäytössä. (Muralidharan et al., 2023)

Nykyisellään kyseisen CIoT alueen todetaan olevan hyvin rikkonainen ja toiminnoiltaan keskenään epäyhteensopiva. Artikkelin mukaan tilalle tarvitaan hajautettu “MINÄ-keskeinen” arkkitehtuuri, jossa korostuu loppukäyttäjä, ja joka kykenee tarjoamaan kuluttajalle hyödyllinen näkymän. Kuva 4.13:n taulukossa esitetään kuinka CIoT eroaa esimerkiksi IIoT:n ja kaupallisen IoT:n (Commercial IoT) ominaisuuksista.

Tärkeimpinä ominaisuuksina hyvän arkkitehtuurin osalta mainitaan joustavuus, skaalautuvuus, monimuotoisuus sekä turvallisuus. Viimeksi mainittu korostuu, koska käsittelykohteena on käyttäjän henkilökohtainen data. Artikkelissa arvioidaan hyödyksi olevia teknologioita. Reunalaskennan (Edge Computing) oletetaan helpottavan datan prosessointia, kun se pitää tuoda

Features	Consumer IoT (CIoT)	Industrial IoT (IIoT)	Commercial IoT
Objective	Consumer-oriented improves the quality of life	Promotes the ability of machines improves production	Large commercial places improves the environment
Use cases	Smart homes, localization, and health monitoring	Monitoring, smart factory, smart agriculture, logistics	HVAC systems, environment monitoring
Number of devices	Small network of devices	Large number of devices	Large number of devices
Data generation	Frequent data, event-based	High volume of data	High volume of data
Data sovereignty	High	Medium to high	Low to medium
Data storage	Decentralized storage	Centralized and decentralized	Centralized and decentralized
Reliability(Packet loss rate)	10^{-9}	10^{-3}–10^{-5}	10^{-3} to 10^{-5}
Latency	10–100 ms	10–150 ms	10–500 ms
Security	High requirement	High requirement	Medium requirement
Visual representation (digital twins)	Precise requirement	Conceptual	Conceptual

Kuva 4.13: Vertailua eri IoT-tyyppien välillä. (Muralidharan et al., 2023)

lähemmäs käyttäjää mm. siirtotien kulujen ja käsittelyssä kuluvan viiveen minimoimiseksi. Hajautuksella käsitellään perinteisen keskitetyn datasäilytyksen käytön haasteita (Taulukko 4.1).

Taulukko 4.1: Keskitetyn palvelun haasteita ja ongelmia, joihin halutaan parannuksia. (Muralidharan et al., 2023)

Haasteita ja ongelma-alueita	Taustat tai syyt, joihin halutaan parannuksia
Tietojenkäsittely ja talletus	Keskitetyssä palvelussa käytössä oleva tiedonsiirron kaista ja applikaatioiden intensiivisyys lisäävät latenssia. Se taas vaikuttaa mm. käyttäjäkokemukseen ja tietoturvaan. Hajautettu palvelu (mm. reunalaskenta) pyrkivät vähentämään latenssia
Kulurakenne ja sen kehittyminen	Keskitetty palvelu lisää tallennuksen kuluja. Siirtokaista, käsittelynopeus, skaalautuminen erilaisten kuluttajalaitteiden tarpeisiin aiheuttavat moniulotteisen kulukertoimen. Hajautettu palvelu mahdollistaa ja voi löytää tarvittavat ratkaisut pienemmillä kokonaiskuluilla.
Yhteensopivuus laitteiden kanssa	Keskitetyn palvelun yhteensopivuusongelmat eri kuluttajalaitteiden dataformaattien kanssa. Hajautettu palvelu voi tarjota joustavammat ratkaisut
Datan omistajuus ja luotettavuus	Keskitetyn palvelun osalta omistajuus ja yksityisyys ovat haastavia hallintakohteita, ja tuloksena datan sisältöön voi kohdistua sensuuria tai vääristymää. Kuluttajalaitteiden käytön kannalta datan luotettavuus on välttämätöntä. Hajautetussa palvelussa omistajuus ja datan yksityisyyden toteuttaminen on suoraviivaisempaa
Tietoturva	Keskitetty palvelu altistaa sisällön suuremmalle tietoturvauhalle kuin hajautetussa palvelussa. Hajautetussa palvelussa tietoturvaongelmat ovat itsenäisiä ja niiden vaikutuksia voidaan rajoittaa.

Turvallisuudessa tulee huomioida mm. laitteiden keskinäisen luotettavuuden tunnistaminen sekä käyttäjän datan väärinkäytösten estäminen. Tässä apuja nähdään löydettävän lohkoketjujen käytöstä. DT:n rooli kattaa kokonaisuuden yksittäisistä laitteista niitä yhdistävään järjestelmään, ja sen avulla voidaan mm. tehdä varsinaisiin laitteisiin liittyvät hallinnolliset asiat. Järjestelmässä voi olla samaan aikaan ylemmän ja alemman tason DT:ja. (Muralidharan et al., 2023)

Luku 5

Case-esimerkit ja käyttötapaukset

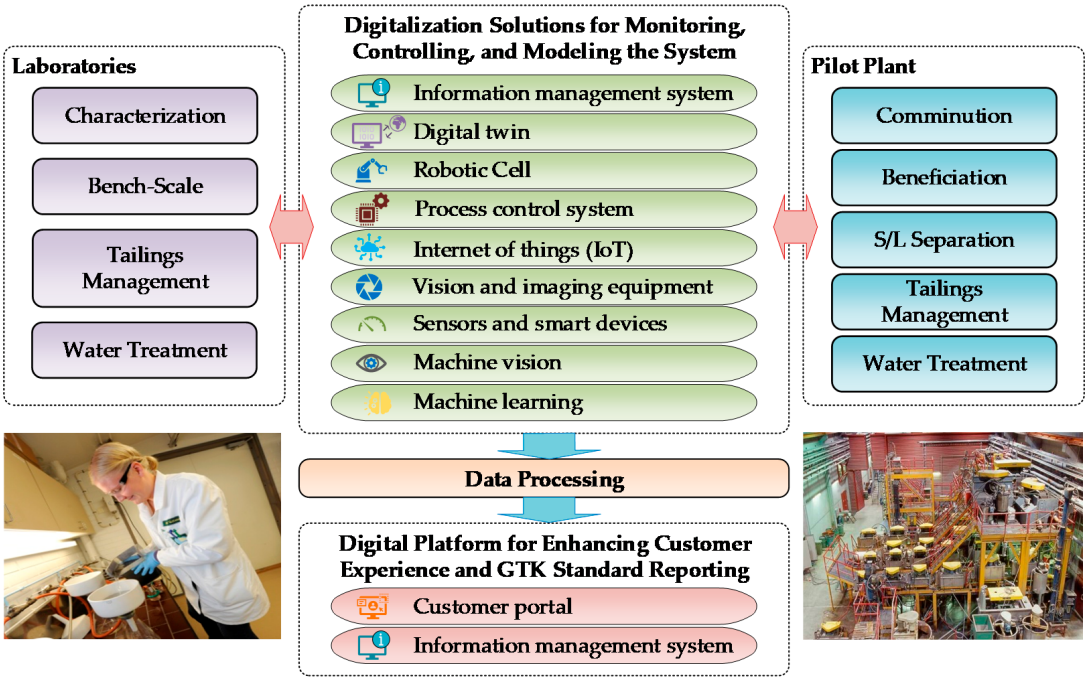
Tässä luvussa käydään lävitse DT-teemaan tarjolla olleista sisällöistä valikoituja esimerkkejä ja käyttötapauksia. Luvun jokaisessa kohdassa käydään lävitse yksi tapaus. Jokainen tapaus on pyritty esittämään rakenteellisesti määrämuotoisena ja yhteneväisenä. Kohta alkaa tapauksen pääidean lyhyellä esittelyllä, jatkuen tarkempana kuvauksena sen hyödyntämistavoista. Näiden jälkeen on mainittu tapauksesta mahdollisesti hyötyvät käyttäjäryhmät, varsinainen DT-integraation taso, sekä käytetyt teknologiat.

Tässä luvussa alikohdat sivutettu muista luvuista poiketen. Täten jokainen esimerkki alkaa määrämuotoisesti sivun alusta.

5.1 Mineraaliteollisuuden digitalisointiratkaisuja

Käyttökohde Mineraaliteollisuudessa toimiva GTK Mintec (Suomi) halusi rakentaa virtuaalisen pilottitehtaan luomalla oikeasta pilottitehtaasta digitaalisen kaksosen. Yrityksen toimipisteellä luodaan useita tehdaspilotteja vuosittain ja digitaalisten ratkaisujen avulla niiden suunnittelua ja testaamista voidaan tehostaa sekä kokeilla uusia vaihtoehtoja.

DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus DT on osa digitaalisia ratkaisuja kokonaisuudessa. Perustana käytettiin digitalisoituja menetelmiä mm. automaatiojärjestelmiin, tiedonhallintaan ja koneoppimiseen pohjautuvaan datan analysointiin liittyen. Kaikki malmiin ja sitä sisältäviin aineksiin ja niiden käsittelyyn liittyvä datalähteet otetaan huomioon. Kuvassa (Kuva 5.1) on esitetty päätason datavirrat, joissa digitalisointiratkaisut tukevat sekä laboratorion toimintaa että varsinaista tehdasta.

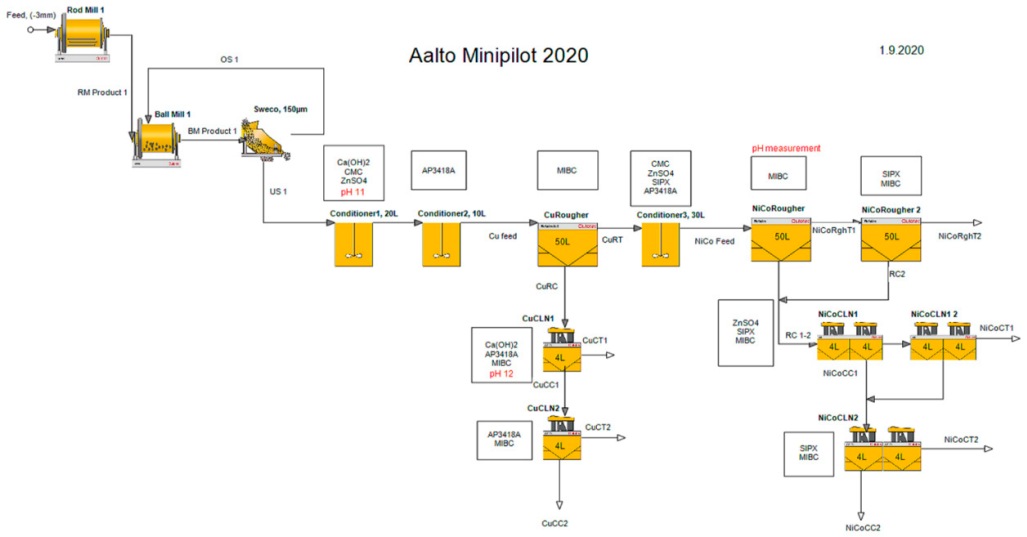


Kuva 5.1: GTK Mintec-alusta ja sen tärkeimmät datavirrat digitaalisaation jälkeen. (Nad et al., 2022)

Laboratoriossa DT:n pääasiallinen käyttö liittyy ainesten pitoisuustestien analysointiin ja arviointiin. Esimerkkinä robotisoidut laboratoriotoiminnat ja niiden kautta saatu nopeampi analysointitieto. Tehdaspilotissa DT on mukana kaikissa muissa toiminnoissa, paitsi datan hankinnassa ja raporttien sekä lopputuotteiden käsittelyssä. Esimerkiksi koneoppivaa ohjausta käytetään mineraalien tunnistamiseen ja niitä käsittelevien koneiden ohjaamiseen. DT:n kautta saadut mitä-jos-ennakoinnit auttavat valitsemaan parhaan tavan ja strategian eri tilanteisiin. Se voi auttaa myös arvioimaan puuttuvia mittaustietoja päivittäisessä käytössä. Yrityksellä on käytössä omia laskentasovelluksia (mm. HSC Rex -järjestelmä). Yhdistämällä kunkin prosessin osalta eri laskentasovelluksissa tuotetut dynaamisen simulaation mallit (Kuva 5.2), saadaan aikaan kokonaisuutta kuvaava simulointi, joka toimii käytettävän DT:n taustalla

DT:n kautta näkyvää simulaatiota voidaan käyttää ja näyttää asiakasportaalin kautta ja näkymiä voidaan räätälöidä.

DT-käyttäjäryhmät Henkilöstö, tutkijat, asiakkaat



Kuva 5.2: Vuokaavio pienoispilotista, joka luotiin HSC Chemistry ohjelmistolla. (Nad et al., 2022)

DT:n taso Varjo (DT vastaanottaa dataa ja sillä voidaan ajaa simulaatioita)

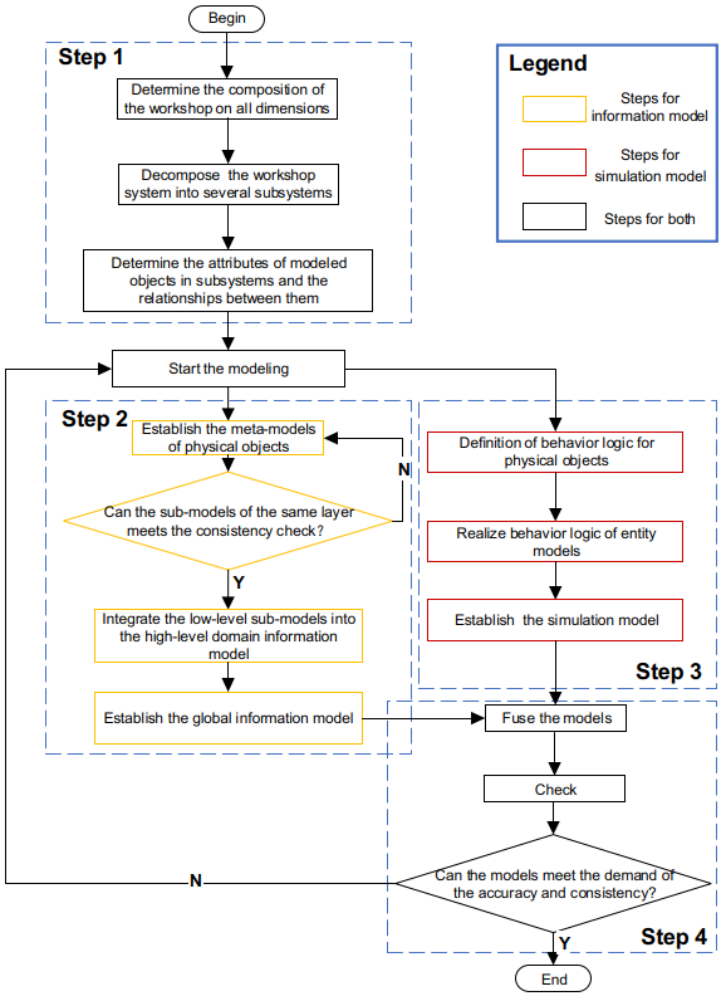
DT-teknologiat Robottisolut, MintecRobo, Information Management System (IMS), Machine Learning (ML), IoT, Konenäkö, USIMPAC [28,29], JKSIMFloat [30], SUPASIM [31,32], MODSIMTM [33], and HSC Chemistry Sim [34].

Lähde: Nad et al. (2022) ”Digitalization Solutions in the Mineral Processing Industry: The Case of GTK Mintec, Finland”

5.2 Hitsaustuotantolinjan DT

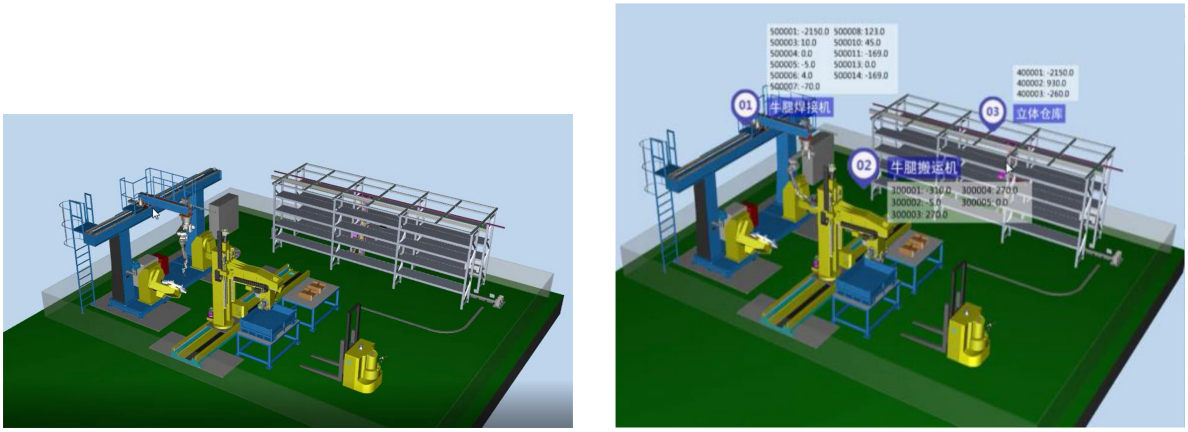
Käyttökohde Laitteistoja valmistavan tehtaan hitsaustuotantolinjan laitteiston mallinnus, esitetyssä muodossa digitaalisen varjon tasolla oleva DT. Tekijöiden tavoitteena on luoda ohjelmistokehys DT:den kehittämistä varten työkaluksi tuotteen elinkaaren hallintaan.

DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus DT:n virtuaalinen toteutusprosessi on kuvattu seuraavassa kuvassa (Kuva 5.3). Nelivaiheinen prosessi alkaa alkaa mallinnettavan järjestelmän, tässä tilan (työpajan), monitasoisella kartoittamisella, jota seuraa alajärjestelmien ja niissä olevien mallinnettujen objektien ominaisuuksien ja yhteyksien etsiminen. Toisessa vaiheessa luodaan mallit, joissa lähdetään fyysisten kappaleiden metamalleista ja päädytään matalamman tason malleista korkeamman tason informaatiomalliin ja siitä yleinen informaatiomalli. Kolmannessa vaiheessa fyysisten kappaleiden toiminnan logiikasta mallinnetaan yksittäisten mallien toimintalogiikat, joista luodaan simulaatiomalli. Neljännessä vaiheessa yleinen informaatiomalli ja simulaatiomalli yhdistetään DT:ksi ja tutkitaan, onko tämän DT:n tarkkuus ja yhteensopivuus riittävällä tasolla vaatimuksiin nähden.



Kuva 5.3: Täysin parametroidun virtuaalisen mallinnuksen toteutus. (Zheng et al., 2019)

Kuva 5.4:ssa esitetään DT-mallinnusesimerkki. Automaattisella hitsaustuotantolinjalla (Kuva 5.4a) on kolme mallinnettua laitetta: hitsauskone, kuljetustrukki, sekä valmiita osia sisältävä monikerroksinen varasto.



(a) Mallinnetut laitteet.

(b) Reaaliaikainen data malliin yhdistettynä.

Kuva 5.4: Hitsaustuotantolinjaston 3D-mallin implementaatio. (Zheng et al., 2019)

DT:n kannalta olennaisimpina kerättävinä sensoridatan lähteinä ovat hitsauskoneessa sen mekaanisen varren siirtymä ja kiertymä sekä hitsauspöydän kiertymä. Kuljetustrukista kerätään samoin siirtymä ja kiertymä. Näistä kerätään yhteensä 19 eri tyyppistä sensoridataa, noin 50 kertaa sekunnissa. Käyttöliittymässä näytettävä data (Kuva 5.4b) on tekijöiden mukaan enimmillään yhden sekunnin verran jäljessä reaaliaikaista tilannetta.

DT-käyttäjäryhmät Tuotannosta ja sen suunnittelusta vastaavat, tuotantotyöntekijät.

DT:n taso Digitaalinen varjo (mallinnus, joka seuraa lähes relaaliajassa fyysistä vastinettaan)

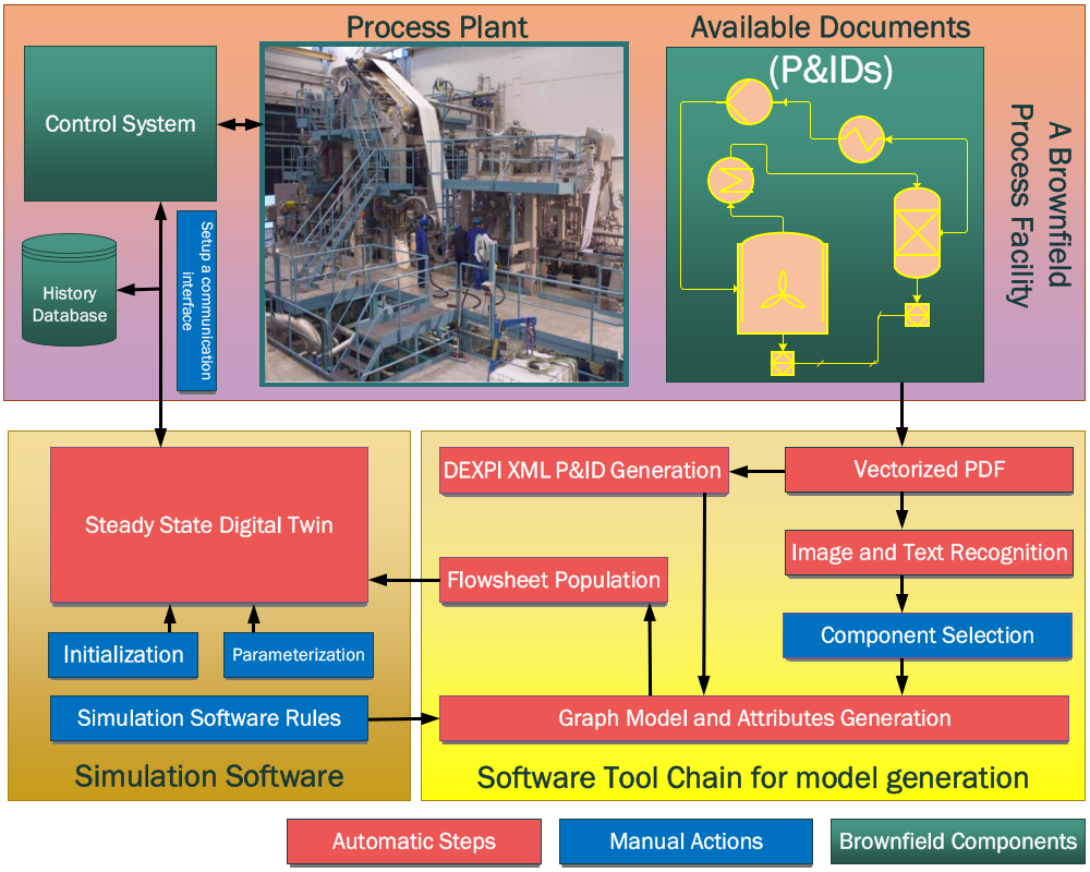
DT-teknologiat Robotiikka, luotu sovelluskehys DT:lle (mm. 3DLayout, 3DMonitoringSystem), Unified Modeling Language (UML), CAD, 3D geometrinen malli, OPC Unified Architecture (OPCUA) https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/, sensoridatan siirto pilvijärjestelmiin

Lähde: Zheng et al. (2019) ”An application framework of digital twin and its case study”

5.3 Tuotantolaitokset: Paperitehtaan ohjausta

Käyttökohde Tehtaan DT:n rakentaminen voi olla vaikeaa, kallista ja aikaa vievää. Artikkelissa luodaan ehdotelma paperitehtaan digitaalisen kaksosen puoliautomatisoidusta rakennusprosessista. Siinä hyödynnetään suunnitteludokumenttien sisältämästä tiedosta teksti- ja kuvatunnistussovelluksilla purettua dataa, josta luodaan karkea graafinen malli. Mallin kohteena toimii Valtion tieteellinen tutkimuskeskus (VTT):n paperin ja pahvin valmistamisen tutkimusyksikön SUORA-pilottilaitteisto.

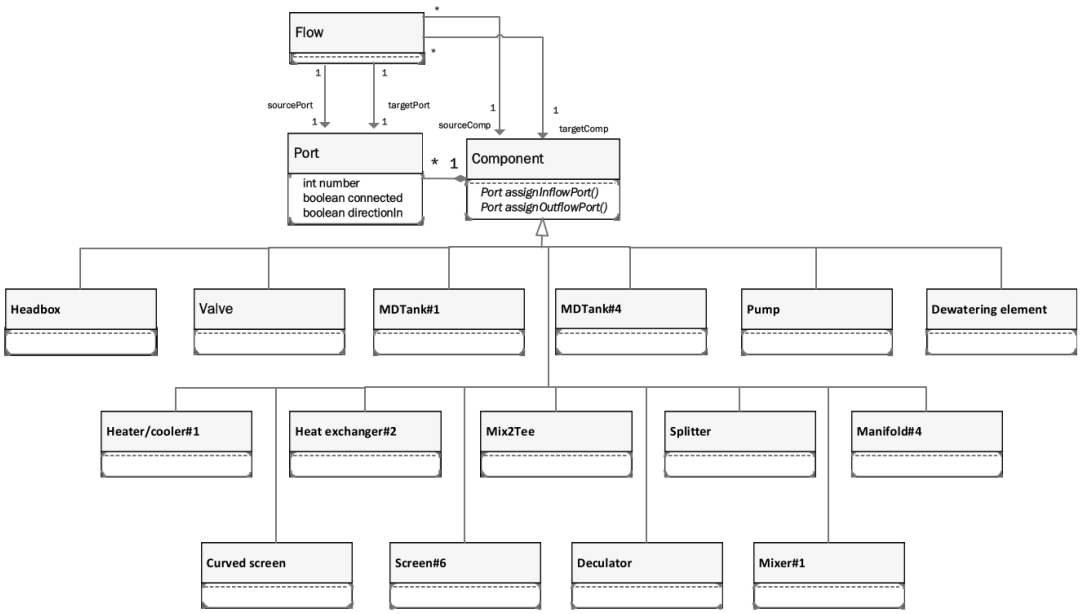
DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus Simulaatiomallin (katso Kuva 5.5) rakentamiseen hyödynnetään Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) nimisiä kaavioita. Tuotantokohteesta voidaan tehdä 3D-skannauksella tuotettua 3D CAD -dataa, joka voidaan yhteensovittaa P&ID:hin.



Kuva 5.5: DT-osajärjestelmien rakenne ja yhteydet eri toimintojen välillä. (Azangoo et al., 2022)

Vastaavasti Portable Document Format (PDF)-muodoissa olevia vuokaavioita ja prosessikuvauksia voidaan muuntaa P&ID:hin. Yhteensovittamiseen voidaan käyttää ISO 10303 ja sovellusprotokolla AP231 määrityksiä. P&ID:t voidaan vaihtoehtoisesti muuntaan "Proteus XML skeemaksi", jota voidaan pitää Industry 4.0 -formaattina. Syntyneen mallin graafisiin symboleihin voidaan kytkeä signaalipisteitä. Signaalipisteiden toiminta taas voidaan kuvata UML-luokkakaavioiden muodossa (Kuva 5.6).

Varsinkin suurten kohteiden tapauksessa digitaalisen kaksosen rakentamiseen käytetyn datasisällön määrä voi kasvaa tarpeettoman suureksi. Tällöin sisällöstä pitää valikoida mukaan vain käytön kannalta tarpeelliset osat.



Kuva 5.6: UML-luokkakaavio elementeistä järjestelmän graafikuvauksesta Balas-simulaattorille. (Azangoo et al., 2022)

DT-käyttäjäryhmät Tehtaan prosessien toiminnasta ja ylläpidosta vastaavat

DT:n taso Varjo (esimerkissä keskityttiin varsinaisen kohteen toiminnnan seuraamiseen)

DT-teknologiat P&ID, 3D CAD, ISO 10303, DEXPI_XML, UML.

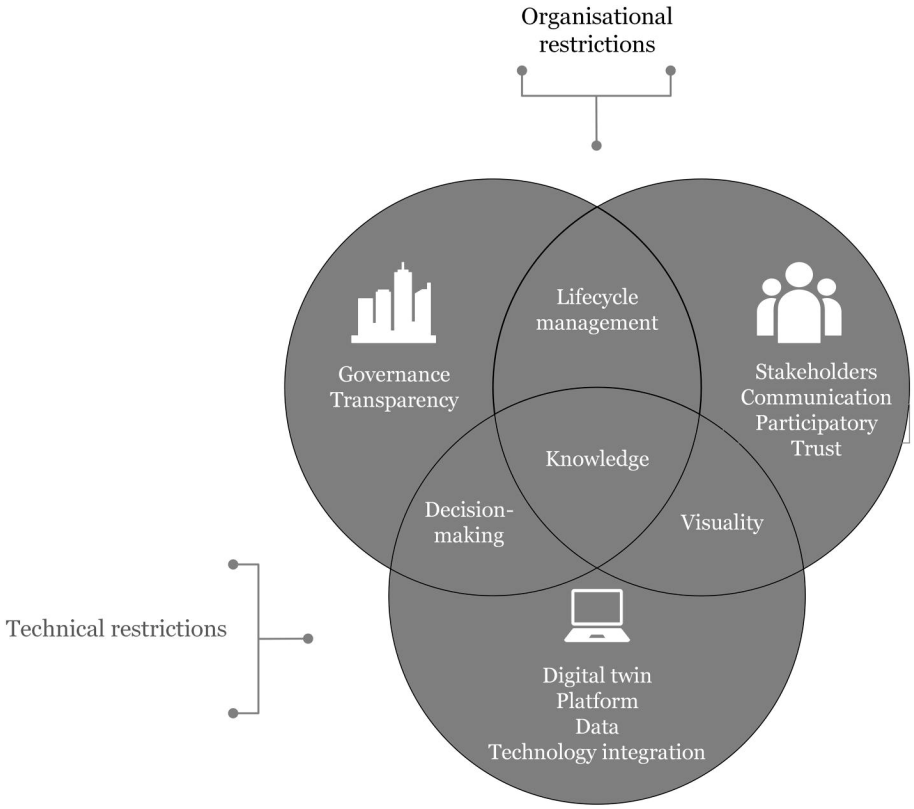
Lähde: Azangoo et al. (2022) "A Methodology for Generating a Digital Twin for Process Industry: A Case Study of a Fiber Processing Pilot Plant"

5.4 Kaupunkisuunnittelua: Älykaupungin kehittämistä

Käyttökohde Artikkelissa tutkitaan DT:n konseptia kaupunkiympäristössä ja tutkitaan sen käytettävyyttä ns. älykaupungin asetuksissa. Artikkelissa mainitaan hyödyntämiskohteina mm. Helsingin Kalasatama.

DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus Älykaupungeissa DT:n hyöty syntyy kaupunkisuunnittelussa, jossa kaksonen mahdollistaa kohteen tutkimisen tietyn toiminnan tai vaihtoehtoisen toteutustavan osalta ennen varsinaista toteuttamista. Esimerkiksi Plannerilla käyttötapauksia voi kokea virtuaalisesti ennen niiden toteuttamista. Haastatelujen kautta tuodaan esille, että 3D-malli tarjoaa päättäjille paljon monipuolisemman ja rikkaamman sisällön kuin 2D-malli. Digitaaliseen malliin voidaan jäljempänä lisätä mm. energian kulutustietoja ja liikennemäärätietoja.

DT-käyttäjäryhmät Useita käyttäjäryhmiä: kaupunkisuunnittelijat, rakennusinsinöörit, yhteisön päättäjät, viranomaiset ja kuntalaiset (Kuva 5.7)



Kuva 5.7: Digitaalisen kaksosen toteutukset älykaupungin kontekstissa. (Hämäläinen, 2021)

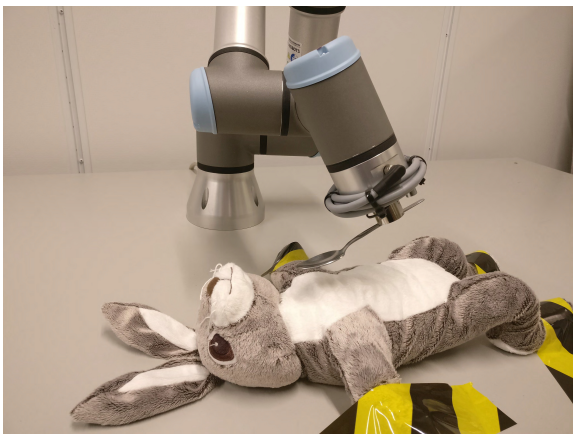
DT:n taso Varjo (teksteissä viitattiin varsinaisesta kohteesa digitaalisessa muodossa katsottaviin tietoihin)

DT-teknologiat CityGML -standardi, Open Cities Planner, Energy Atlas Platform.
Lähde: Hämäläinen (2021) ”Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city”

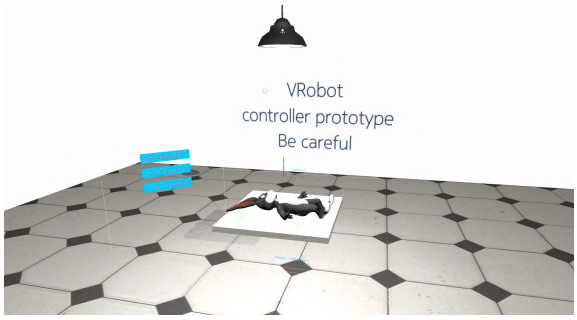
5.5 Simulointi ja optimointi: Robottiohjattua etäkirurgiaa

Käyttökohde Esimerkissä kehitettiin DT-konseptia tai -prototyyppiä erityiskäyttöön, tässä tapauksessa mobiiliverkon yli ohjattava kirurgialeikkaus (Kuva 5.8), jossa vaaditaan alhaista viivettä (latenssi) sekä korkeaa luotettavuutta ja turvallisuutta.

DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus Toimintakokonaisuutta yksinkertaistettiin, jotta voitiin keskittyä paremmin teknisiin toiminnallisuuksiin. Varsinaista käyttökohdetta simuloivassa järjestelmässä (Kuva 5.8a ja Kuva 5.8b) on mukana robottikäsi, VR-järjestelmä (sisältäen VR-lasit ohjaimineen) sekä 4G-mobiiliverkko. Liikkeiden mittaamista varten käytössä oli infrapunalaserverkko. Ohjelmiston kehitysympäristönä toimi Valven tuottama ohjelmiston kehitysympäristö (Software Development Kit (SDK)). Lisäksi ohjaus- ja käyttökohteeseen tarvittiin tietokoneet palvelinohjelmistoineen ja niiden välille reitittimet sekä Virtual Private Network (VPN)-yhteys/palvelu.



(a) Robottikäsi pitelemässä instrumenttia simuloidussa etäkirurgisessa operaatiossa.



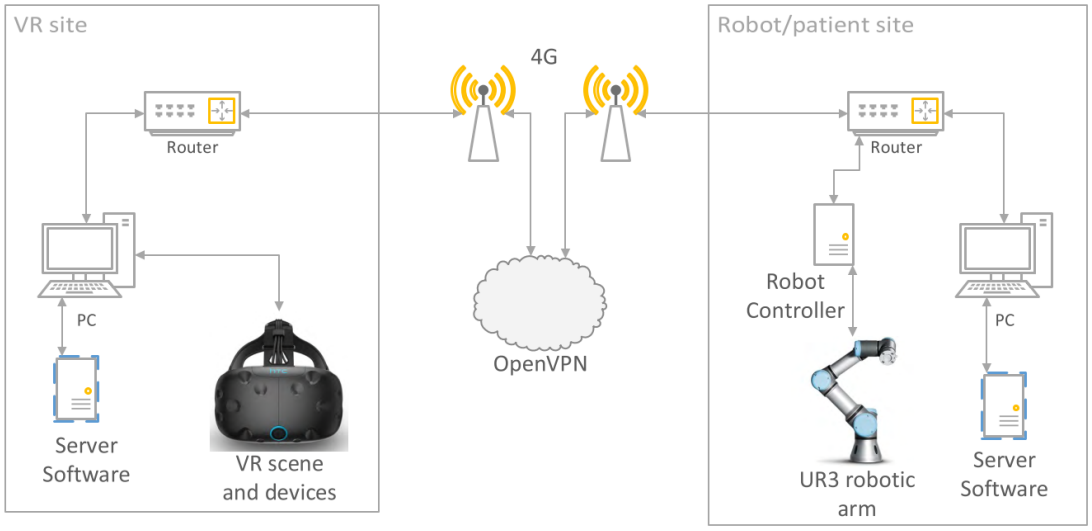
(b) Yksinkertaistettu VR-näkymä leikkaustilanteesta.

Kuva 5.8: Etäkirurgiaa mobiiliverkon yli. (Laaki et al., 2019)

Robottikäteen oli integroitu magneetti työkaluihin tarttumista varten, ja välineiden vaihto ja poiminta opetettiin robottikädelle erillisenä toimintona. VR-ohjaimista saatu liikkeiden sijaintitieto muutettiin robotin liikeradoiksi. Yhtenä haasteena oli saada VR-järjestelmän ja robottikäden käyttämät liikeratamuutokset yhteensopiviksi. Rajoituksia ilmeni robottikäden liikkeiden nopeudessa. Toinen liikeratoihin liittyvä haaste oli VR:n ja robottikäden välisten mittasuhteiden muuntaminen ja robotin liikkeiden turvarajojen asettaminen. Turvallisuusnäkökulman osalta asetettiin rajoituksia liikesarjojen tietojen saapumisjärjestykselle. VR-ohjaimiin yritettiin lisätä myös haptista palautetta, mutta sen ei todettu olevan kovin toimiva.

Prototyyppijärjestelmän rakennetta mobiiliverkon näkökulmasta on esitetty Kuva 5.9:n mukaisesti. Verkkoon kohdistuvien hyökkäysten ja väärän datan suodattamiseen käytettiin neuroverkkomallia tunnistamaan normaali dataliikenne poikkeavista. Robottikäteen myös liitettiin videokamera, jonka syöte näytettiin käyttäjälle osana VR-ympäristöä. Toiminnan viiveet pysyivät alle 150 millisekunnissa. Perinteisen Application Programming Interface (API)-rajapinnan sijasta yhteydenpito piti luoda reaaliaikaisena.

DT-käyttäjäryhmät Järjestelmää koekäytettiin yli 70 koehenkilön voimin. Käyttöpaikka sijaitsi yleensä noin 10 km päässä käyttökohteesta ja käyttöpaikan yleisöä varten käyttökohteesta tuotettiin videoyhteys tilanteen seuraamisen avuksi. Osalla koekäyttäjistä oli aiempaa kokemusta VR:stä (15%) ja osalle käyttökerta oli ensimmäinen (80%). Lisäksi oli käyttäjiä, joille VR:n



Kuva 5.9: Prototyyppijärjestelmän verkkotopologia. (Laaki et al., 2019)

käyttö ei luonnistunut lainkaan (5%).

DT:n taso Digitaalinen kaksonen (ohjaus ja vaste tapahtuu reaaliajassa)

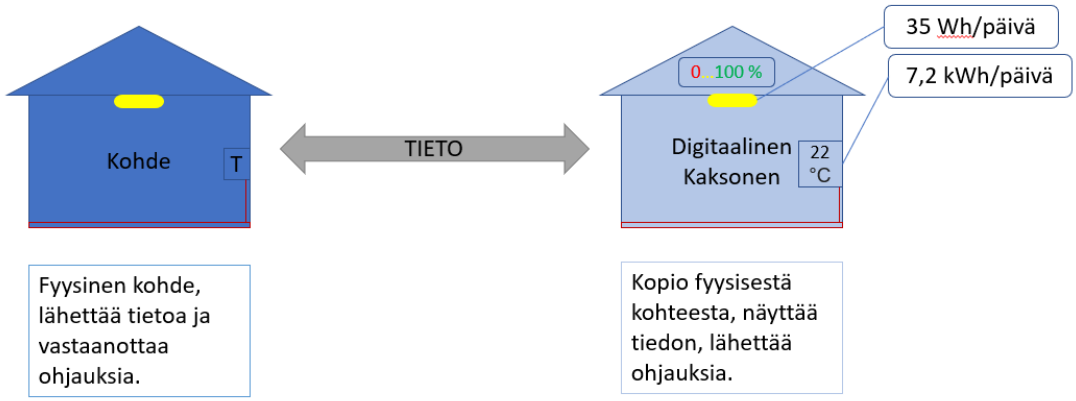
DT-teknologiat HTC Vive virtual reality (VR) system, Head Mounted Display (HMD) (head mounted display), Universal Robots 3 series (UR3), Open VR, OpenVPN, Distributed Denial of Service (DDoS).

Lähde: Laaki et al. (2019) ”Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery”

5.6 Kiinteistön huolto ja käyttö

Käyttökohde AMK-opinnäytteessä selvitettiin kiinteistökäyttöön soveltuvien DT-ratkaisujen nykytilaa Suomessa. taustoituksessa tuodaan esiin se, kuinka vähäiselle käytölle rakennusvaiheessa käytetty BIM-malli on rakentamisen jälkeen, vaikka sitä voitaisiin hyödyntää DT:n pohjalla. DT voidaan luoda myös jälkikäteen ja näistä työssä mainitaan laserskannaus pistepilven avulla sekä erilaisia kuvia yhdistelevä fotogrammetria.

DT:een hyödyntämistapa ja kuvaus Esimerkiksi rakennuslaki edellyttää tulevaisuudessa rakennukseen tehtyjen muutosten dokumentointia. Sähkölaitteiden osalta digitaalinen malli kohteesta auttaisi mm. paikantamaan laitteita ja työkohteita sekä seuraamaan anturien tuottamia mittaustietoja etänä (katso Kuva 5.10).



Kuva 5.10: Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen rakennuskohteesta saatavien tietojen esittämiseen. (Pakarinen, 2022)

Industry Foundation Classes (IFC)-mallit, Representational State Transfer (REST)-rajapinta, Building Management System (BMS), Mechanical, Electrical and Plumbing (MEP)-järjestelmä tarjoavat dataa DT:lle. DT:ssä IoT:n hyödyntäminen voi näkyä esimerkiksi valaisimen käyttötuntien vertailuna sille luvattuun käyttötuntimäärään. DT-älytaloratkaisuissa huomioitavaksi tulevat myös väyliin (kuten KNX, ZigBee, tai Digital Addressable Lighting Interface (DALI)) liitetyt laitteet.

DT-käyttäjäryhmät Kiinteistön haltija, Huollosta tai ylläpidosta vastaavat,

DT:n taso Varsinaista toteutusta ei tehty, mutta selvityksessä käsitellään kaksisuuntaiseen toimintaan kykenevää kokonaisuutta

DT-teknologiat Granlund manager, Caverion SmartView, 3D-talo ja N1Digital jne. (kts opinnäytetyön taulukko 2).

Lähde: Pakarinen (2022) *Digitaalinen kaksonen kiinteistön huollossa ja käytössä*

Kirjallisuus

I. Anda, R. Mishra ja A. M. Aliyu, ”Data Security Management Framework for Digital Twins of Industrial Pipeline,” teoksessa *2021 International Conference on Maintenance and Intelligent Asset Management (ICMIAM)*, 2021, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICMIAM54662.2021.9715199.

M. Azangoo, L. Sorsamäki, S. A. Sierla, T. Mätäsniemi, M. Rantala, K. Rainio ja V. Vyatkin, ”A Methodology for Generating a Digital Twin for Process Industry: A Case Study of a Fiber Processing Pilot Plant,” *IEEE Access*, vol. 10, s. 58 787–58 810, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3178424.

A. Barni, A. Fontana, S. Menato, M. Sorlini ja L. Canetta, ”Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances,” teoksessa *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 2018, s. 706–713. DOI: 10.1109/IS.2018.8710554.

C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki ja Y. Rezgui, ”Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research,” *Automation in Construction*, vol. 114, s. 103 179, kesäkuu 2020, ISSN: 0926-5805. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179. url: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519314785 (viitattu 16. 10. 2023).

S. Boschert ja R. Rosen, ”Digital Twin—The Simulation Aspect,” teoksessa *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger ja D. Bradley, toim. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 59–74, ISBN: 978-3-319-32156-1. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5. url: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5.

A. Buja, M. Apostolova, A. Luma ja Y. Januzaj, ”Cyber Security Standards for the Industrial Internet of Things (IIoT)– A Systematic Review,” teoksessa *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/HORA55278.2022.9799870.

L. R. Delfino, A. S. Garcia ja R. L. de Moura, ”Industrial Internet of Things: Digital Twins,” teoksessa *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2019, s. 1–3. DOI: 10.1109/IMOC43827.2019.9317591.

M. Enders ja N. Hoßbach, ”Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review,” *AMCIS 2019 Proceedings*, heinäkuu 2019. url: https://aisel.aisnet.org/amcis2019/org_transformation_is/org_transformation_is/20.

A. Fuller, Z. Fan, C. Day ja C. Barlow, ”Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research,” *IEEE Access*, vol. 8, s. 108 952–108 971, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

B. Godager, E. Onstein ja L. Huang, ”The Concept of Enterprise BIM: Current Research Practice and Future Trends,” *IEEE Access*, vol. 9, s. 42 265–42 290, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3065116.

M. Grieves ja J. Vickers, ”Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” teoksessa *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt ja A. Alves, toim., Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 85–113, ISBN: 978-3-319-38756-7. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4. url: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

J. Grönman, P. Rantanen ja M. Saari, ”Categorization of Digital Twins: A Literature Review of IoT and Industry,” teoksessa *27th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2023 (INES)*, 2023.

B. He ja K.-J. Bai, ”Digital Twin-based Sustainable Intelligent Manufacturing: A Review,” *Advances in Manufacturing*, vol. 9, nro 1, s. 1–21, maaliskuu 2021, ISSN: 2195-3597. DOI: 10.1007/s40436-020-00302-5. url: https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5.

M. Hämäläinen, ”Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city,” *IET Smart Cities*, vol. 3, nro 4, s. 201–210, 2021. DOI: https://doi.org/10.1049/smc2.12015. eprint: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/smc2.12015. url: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/smc2.12015.

V. U. Ihekoronye, C. I. Nwakanma, G. O. Anyanwu, D.-S. Kim ja J.-M. Lee, ”Benefits, Challenges and Practical Concerns of IoT for Smart Manufacturing,” teoksessa *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2021, s. 827–830. DOI: 10.1109/ICTC52510.2021.9620771.

R. S. Kenett ja J. Bortman, ”The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective,” *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 38, nro 3, s. 1357–1366, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/qre.2948. eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qre.2948. url: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qre.2948.

S. Khan, T. Arslan ja T. Ratnarajah, ”Digital Twin Perspective of Fourth Industrial and Healthcare Revolution,” *IEEE Access*, vol. 10, s. 25 732–25 754, 2022, Conference Name: IEEE Access, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3156062. url: https://ieeexplore.ieee.org/document/9726212 (viitattu 16. 10. 2023).

W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes ja W. Sihn, ”Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018, vol. 51, nro 11, s. 1016–1022, tammikuu 2018, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474. url: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021 (viitattu 16. 10. 2023).

S. S. Kumar, A. S. Bale, P. M. Matapati ja V. N, ”Conceptual Study of Artificial Intelligence in Smart Cities with Industry 4.0,” IEEE, maaliskuu 2021, s. 575–577, ISBN: 978-1-7281-7741-0. DOI: 10.1109/ICACITE51222.2021.9404607. url: https://ieeexplore.ieee.org/document/9404607/.

H. Laaki, Y. Miche ja K. Tammi, ”Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery,” *IEEE Access*, vol. 7, s. 20 325–20 336, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2897018.

L. M. I. Leo Joseph, T. Kumar, D. K. Gulati, D. Narinder Kumar Bhasin, D. D. Chahal ja D. S. Thangjom, ”Sustainability Criteria for Digital Dual Systems and Meta-Systematic Appraisal,” teoksessa *2022 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICSES55317.2022.9914381.

K. Li, Y. Cui, W. Li, T. Lv, X. Yuan, S. Li, W. Ni, M. Simsek ja F. Dressler, "When Internet of Things Meets Metaverse: Convergence of Physical and Cyber Worlds," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, nro 5, s. 4148–4173, 2023. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3232845.

L. Li, T. Qu, Y. Liu, R. Y. Zhong, G. Xu, H. Sun, Y. Gao, B. Lei, C. Mao, Y. Pan, F. Wang ja C. Ma, "Sustainability Assessment of Intelligent Manufacturing Supported by Digital Twin," *IEEE Access*, vol. 8, s. 174 988–175 008, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026541.

X. Liang, R. Xiao ja J. Zhang, "A Review on Digital Twin for Robotics in Smart Manufacturing," teoksessa *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2022, s. 1510–1515. DOI: 10.1109/ICIEA54703.2022.10006119.

A. A. Malik ja A. Bilberg, "Digital twins of human robot collaboration in a production setting," *Procedia Manufacturing*, vol. 17, s. 278–285, 2018, 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USAGlobal Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity, ISSN: 2351-9789. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.047. url: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918311636.

S. Mihai et al., "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, nro 4, s. 2255–2291, 2022. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773.

R. Minerva, G. M. Lee ja N. Crespi, "Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models," *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, nro 10, s. 1785–1824, lokakuu 2020, Conference Name: Proceedings of the IEEE, ISSN: 1558-2256. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2998530. url: https://ieeexplore.ieee.org/document/9120192 (viitattu 16. 10. 2023).

V. Mullet, P. Sondi ja E. Ramat, "A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 9, s. 23 235–23 263, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3056650.

S. Muralidharan, B. Yoo ja H. Ko, "Decentralized ME-Centric Framework—A Futuristic Architecture for Consumer IoT," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 12, nro 3, s. 39–50, 2023. DOI: 10.1109/MCE.2022.3151023.

G. Mylonas, A. Kalogeras, G. Kalogeras, C. Anagnostopoulos, C. Alexakos ja L. Muñoz, "Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey," *IEEE Access*, vol. 9, s. 143 222–143 249, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120843.

A. Nad, M. Jooshaki, E. Tuominen, S. Michaux, A. Kirpala ja J. Newcomb, "Digitalization Solutions in the Mineral Processing Industry: The Case of GTK Mintec, Finland," *Minerals*, vol. 12, nro 2, 2022, ISSN: 2075-163X. DOI: 10.3390/min12020210. url: https://www.mdpi.com/2075-163X/12/2/210.

R.-P. Nikula, "Digitaalinen kaksonen tarvitsee ajantasaista adaptaatiota," *Automaatioväylä*, nro 4, s. 14–15, 2019, ISSN: 0784-6428.

S. Pakarinen, *Digitaalinen kaksonen kiinteistön huollossa ja käytössä*. 2022. url: https://www.theseus.fi/handle/10024/744195.

D. Ratnayake, P. Lohit, B. Singh ja V. P. Mishra, "Analysis of Machine Learning Algorithms in Smart Manufacturing," IEEE, kesäkuu 2020, s. 707–712, ISBN: 978-1-7281-7016-9. DOI: 10.1109/ICRITO48877.2020.9198017. url: https://ieeexplore.ieee.org/document/9198017/.

K. Reeves ja C. Maple, "Realising the vision of digital twins: Challenges in trustworthiness," teoksessa *Living in the Internet of Things (IoT 2019)*, 2019, s. 1–7. DOI: 10.1049/cp.2019.0164.

J. Rüb ja H. Bahemia, "A Review of the Literature on Smart Factory Implementation," teoksessa *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2019, s. 1–9. DOI: 10.1109/ICE.2019.8792577.

B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu ja S. Wartzack, "Shaping the digital twin for design and production engineering," *CIRP Annals*, vol. 66, nro 1, s. 141–144, 2017, ISSN: 0007-8506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040. url: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617300409.

M. Vuković, D. Mazzei, S. Chessa ja G. Fantoni, "Digital Twins in Industrial IoT: a survey of the state of the art and of relevant standards," teoksessa *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2021, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473889.

Y. Zheng, S. Yang ja H. Cheng, "An application framework of digital twin and its case study," teoksessa 2019, vol. 10, s. 1141–1153. DOI: 10.1007/s12652-018-0911-3. url: https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3.