

Tino Taipale

Langattomien sensoriverkkojen haasteet teollisuudessa

Tietotekniikan
pro gradu -tutkielma
13. marraskuuta 2024

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Tekijä: Tino Taipale

Yhteystiedot: taipaltt@student.jyu.fi

Puhelinnumero: -

Ohjaaja: Niko Mäkitalo

Työn nimi: Langattomien sensoriverkkojen haasteet teollisuudessa

Title in English: The challenges of wireless sensor networks in industry

Työ: Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 78+0

Tiivistelmä: Langattomien sensoriverkkojen laajamittainen hyödyntäminen on arkipäivää monissa sovelluksissa eri aloilla ja niiden avulla saavutettavat hyödyt ovat kiistattomia. Teollisuuden käyttökohteissa langattomiin sensoriverkkoihin kuitenkin kohdistuu lukuisia haasteita ja ongelmia jotka rajoittavat niiden tehokasta ja laajamittaista hyödyntämistä. Tässä pro gradu -tutkielmassa suoritetaan laaja ja systemaattinen kirjallisuuskatsaus teollisuuden sensoriverkoille asettamien haasteiden ja rajoitteiden selventämiseksi.

Katsauksen tuloksena huomattiin että langattomat sensoriverkot voivat parantaa prosessien tehokkuutta ja vähentää kustannuksia, mutta ne kohtaavat myös merkittäviä haasteita kun niitä sovelletaan haastavissa teollisuusympäristöissä. Tuloksissa yksilöidään keskeisiä haasteita, kuten ympäristöhäiriöt, sensorinoodien rajoittunut käyttöikä ja laskentateho, sekä IWSN-verkkojen (Industrial Wireless Sensor Network, teollinen langaton sensoriverkko) hallintaan ja käyttöönottoon liittyvät ongelmat. Katsauksen tulokset selventävät teollisuuden haasteita langattomille sensoriverkoille ja sen avulla tutkielma pyrkii myös edistämään langattomien sensoriverkkoteknologioiden kehitystä ja niiden soveltamista eri teollisuudenaloilla tulevaisuudessa.

Avainsanat: langattomat sensoriverkot, systemaattinen kirjallisuuskatsaus, teollisuus

Abstract: The widespread use of wireless sensor networks is common in many applications across different sectors and the benefits are undeniable. However, in industrial applications, wireless sensor networks face numerous challenges and problems that limit their effective and large-scale utilization. In this thesis, an extensive and systematic literature review is conducted to clarify the challenges and limitations of industrial wireless sensor networks.

The review found that wireless sensor networks can improve process efficiency and reduce costs, but they also face significant challenges when applied in chal-

lenging industrial environments. The results identify key challenges such as environmental interference, limited node lifetime and computing power, and problems associated with the management and deployment of IWSNs (Industrial Wireless Sensor Network). The results of the literature review will clarify the industrial challenges for wireless sensor networks and will also hopefully contribute to the future development of wireless sensor network technologies and their application in different industrial sectors.

Keywords: wireless sensor networks, systematic literature review, industry

Copyright © 2024 Tino Taipale

All rights reserved.

Sanasto

6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks. IPv6 paketteja hyödyntävä 802.15.4 pohjainen teknologia.
GPS	Global Positioning System. Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä.
IIoT	Industrial Internet of Things. Teollinen esineiden internet.
IoT	Internet of Things. Esineiden internet.
ISA100	Kansainvälisen automaatioseuran (International Society of Automation) julkaisema langattomien sensoriverkkojen teknologia.
ISM (band)	Industrial, Scientific and Medical. Hyväksytyille laitteille lisenssivapaat taajuusalueet.
ITU	International Telecommunication Union. Kansainvälinen televiestintäliitto.
IWSN	Industrial Wireless Sensor Network. Teollinen langaton sensoriverkko.
LoRa	Long Range. Radiospektrin hajauttamiseen (spread spectrum) perustuva radioteknologia.
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network. LoRa tekniikkaa hyödyntävä langaton kommunikointi- ja verkkoteknologia.
LR-WPAN	Low-rate Wireless Personal Area Network. 802.15.4 standardin määrittelemä verkko.
MAC	Medium Access Control. Verkon varaamiseen ja käyttämiseen liittyvä järjestelmä.
Middleware	Sensorinoodin sovellukselle lisätoiminnallisuutta tarjoava ohjelmakerros.
QoS	Quality of service. Verkkoliikenteen palvelun laatu ja priorisointi.

RSSI	Received Signal Strength Indicator. Vastaanotetun signaalin tehoa mittaava arvo.
RTC	Real-time computing. Reaaliaikainen tietojenkäsittely.
SE	Software Engineering. Ohjelmistotuotanto.
Sigfox	ISM-taajuuksia hyödyntävä langaton kommunikointitek- nologia.
SINK	Viestejä ja dataa vastaanottava laite tai noodi.
SLR	Systematic Literature Review. Systemaattinen kirjallisuus- katsaus.
SMS	Systematic Mapping Study. Systemaattinen kirjallisuuskar- toitus.
WIA-FA	Wireless Networks for Industrial Automation and Factory Automation. Teollisuuden tehdasautomaatioon luotu lan- gaton sensoriverkkoteknologia.
WIA-PA	Wireless Networks for Industrial Automation and Process Automation. Teollisuuden prosessiautomaatioon luotu lan- gaton sensoriverkkoteknologia.
WirelessHART	Highway Addressable Remote Transducer Protocol (HART) pohjainen langattomien sensoriverkkojen tekno- logia.
WSAN	Wireless Sensor-Actuator Network. Langaton sensori- toimilaiteverkko.
WSN	Wireless Sensor Network. Langaton sensoriverkko.
ZigBee	802.15.4 pohjainen langattomille sensoreille tarkoitettu PAN (Personal Area Network) teknologia.

Sisällys

Sanasto	i
1 Johdanto	1
2 Tutkimuksen lähtökohdat	3
2.1 Tutkimuskysymys	3
2.2 Kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä	4
2.3 Kartoitusprosessi	5
3 Kirjallisuuskatsaus	9
3.1 Hakustrategia	10
3.2 Hakuprosessi	11
3.3 Tiedon poiminta	14
3.4 Kirjallisuuskatsauksen tulokset	14
3.5 Sensoriverkkojen haasteiden kuvaus	24
4 Pohdinta	39
4.1 Tulosten arviointi	39
4.2 Tutkimuksen rajoitteet ja jatkotutkimukset	42
5 Yhteenveto	45
Lähteet	47
Liitteet	

1 Johdanto

Langattomien teknologioiden jatkuva kehitys on mahdollistanut erilaisten sensorinoodien hyödyntämisen useilla eri teollisuuden aloilla esimerkiksi logistiikan ja energiatuotannon ja -toimituksen parissa, mutta käyttökohteet eivät kuitenkaan rajoitu ainoastaan niihin. Langattomat noodit ja niiden muodostamat sensoriverkot (WSN, Wireless sensor networks) ovat suunniteltu keräämään dataa erilaisista kohteista, ympäristöistä tai ilmiöistä, joten langattomia sensoriverkkoja voidaan hyödyntää monipuolisissa tehtävissä kunhan sensoriverkko vain vastaa käyttökohteen asettamia vaatimuksia.

Teollisuuden ympäristöt asettavat usein merkittäviä haasteita langattomille sensoriverkoille erityisesti kovien olosuhteiden vuoksi, mutta sensoriverkoille asetetut vaatimukset voivat olla hyvinkin yksilöllisiä käyttökohteesta riippuen. Esimerkiksi öljyjalostamoon asennettavat sensorinoodit ja -verkot eivät välttämättä täytä ydinvoimalaan asennettavien sensorinoodien vaatimuksia, joten langattomien sensoriverkkojen tehokas hyödyntäminen vaatii huolellista suunnittelua ja mahdollisia kompromisseja käyttökohteesta riippumatta [124].

Haasteista huolimatta langattomien sensoriverkkojen käyttäminen teollisuuden käyttökohteissa tarjoaa lukuisia tavoittelemisen arvoisia hyötyjä. Langattomien sensorinoodien joustavat asennusominaisuudet ja käyttöönotto sekä siihen liittyvät kustannukset ovat usein yksi suurimmista syistä langattomien sensoriverkkojen hyödyntämiseen esimerkiksi kiinteisiin johdotuksiin ja mittalaitteiden asennukseen verrattuna. Langattomat noodit tarjoavat myös käyttömahdollisuuksia jotka eivät välttämättä olisi muuten mahdollisia kuten liikkuvat robotit [140], joten langattomien sensoriverkkojen entistä laajempi hyödyntäminen tulevaisuudessa on tavoittelemisen arvoista.

Langattomat sensoriverkot ovat merkittävä osa nykypäivän IoT-paradigmaa (IoT, Internet of Things), jossa langattomasti kommunikoivat laitteet pystyvät tuottamaan ja siirtämään tietoja eri järjestelmien välillä tuottaakseen hyötyä käyttäjälle [17]. Kyseinen paradigma on sopeutunut hiljalleen myös teollisuuden käyttökohteiden piiriin, jolloin voidaan puhua teollisesta esineiden internetistä (IIoT, Industrial Internet of Things). Vaatimattomampaan kuluttajakäyttöön tarkoitettua langattomaa sen-

sensoriverkot ovat kehittyneet merkittävästi, mutta teollisuuden langattomat sensoriverkot (IWSN, Industrial wireless sensor networks) omaavat paljon haasteita, jotka rajoittavat vielä niiden täysimittaista hyödyntämistä. Yksilöllisten vaatimusten ja käyttökohteiden vuoksi teollisuudessa hyödynnettävien sensoriverkkojen suurimpia haasteita on vaikea määritellä yksittäisten sovellusten perusteella, joten rajoitteiden ja haasteiden käsittäminen kokonaisuudessaan vaatii laajempaa tarkastelua. Haasteiden ja rajoitteiden selvittäminen merkittävässä laajuudessa voi tarjota ohjenuoran tulevaisuuden kehitykselle, jolloin mahdollisimman monet teollisuuden käyttökohteet voivat hyötyä kehityksestä.

Tutkimuksen tavoitteena on tarjota eksplisiittisiä vastauksia ja huomioita langattomien sensoriverkkojen hyödyntämisen haasteisiin teollisuuden käyttökohteissa. Tutkimuskysymyksen "Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?"asettelulla pyritään tavoittelemaan laajoja, mutta kuitenkin vahvasti teollisuuteen kohdistuvia vastauksia erilaisista haasteista ja rajoitteista langattomiin sensoriverkkoihin liittyen. Tutkimuskysymykseen vastataan suorittamalla systemaattinen kirjallisuuskatsaus, jonka avulla saadaan hyödynnettyä aikaisemmin tuotettua tietoa ja kirjallisuutta varsin tehokkaasti ja laajasti.

Kirjallisuuskatsauksen tulokseksi muodostuu laajan ja monipuolisen aineiston pohjalta tilastoitu taulukko langattomien sensoriverkkojen haasteista ja rajoitteista teollisuuden käyttökohteissa. Tuloksista selviää erityisesti teollisuuden asettamat suurimmat haasteet ja rajoitteet sensoriverkoille kommunikoinnin, hallinnan, suorituskyvyn, turvallisuuden sekä ympäristön suhteen. Suurimpana haasteena tuloksista ilmenee teollisuuden vaatimukset luotettavuuden ja toimintavarmuuden suhteen, joita monet langattomat sensoriverkot eivät pysty välttämättä täyttämään. Langattomien sensoriverkkojen hyödyntäminen osana teollisuuden kriittisiä prosesseja asettaa kovia vaatimuksia, mutta se ei tarkoita ettei langattomat sensoriverkot voisi olla merkittävässä osassa esimerkiksi ympäristön ja olosuhteiden valvontaan keskittyvissä järjestelmissä.

Luvussa 2 käsitellään tutkimuksen lähtökohdat tutkimuskysymyksen sekä käytettävän tutkimusmenetelmän osalta. Luvussa 3 esitetään tutkimuskysymykseen vastaavan kirjallisuuskatsauksen vaiheet ja tuotetut tulokset. Luvussa 4 esitetään tuloksiin sekä tutkimuksen rajoitteesiin liittyvää pohdintaa. Luku 5 tarjoaa yhteenvedon tutkimuksen tuloksista ja niiden merkityksestä.

2 Tutkimuksen lähtökohdat

Tämä luku esittelee tarvittavat teoreettiset tiedot ja lähtökohdat myöhemmin Luvussa 3 esitettyyn kirjallisuuskatsaukseen. Tässä luvussa esiteltävät tiedot ja menetelmät noudattavat vahvasti kirjallisuudessa esitettyä muotoaan joita myös tämä tutkimus mukailee.

Aliluku 2.1 esittelee tutkimuksen lähtökohtaiset tutkimuskysymykset ja niiden avulla asetetut tavoitteet tutkimukselle. Aliluvussa 2.2 esitellään teoreettinen pohja kirjallisuuskatsaukseen ja selvennetään eroja kirjallisuuskatsauksen ja -kartoituksen välillä.

2.1 Tutkimuskysymys

Tämän tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraavana esitettyyn tutkimuskysymykseen. Tutkimuskysymys on asetettu seuraavasti:

- Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?

Tutkimuskysymysten tavoitteena on kartoittaa ja selventää kahden laajemman kokonaisuuden yhteensopivuutta ja erityisesti siinä esiintyviä haasteita. Tutkimus pyrkii siis keskittymään teollisten ympäristöjen sekä langattomien sensoriverkkojen yhteensovittamisessa esiintyviin haasteisiin ja niiden ratkaisemiseen.

Asetetun tutkimuskysymyksen pyrkimyksenä on syventyä kirjallisuudessa esitettyihin sensoriverkkojen haasteisiin ja rajoitteisiin nimenomaan teollisuuden järjestelmien ja ympäristöjen näkökulmasta. Teollisuuden ympäristöt asettavat usein erityisiä vaatimuksia siellä käytettäville järjestelmille, joten tutkimuskysymyksen avulla pyritään saamaan eksplisiittisiä vastauksia paitsi sensoriverkkojen haasteista, mutta osittain myös tärkeimmistä ominaisuuksista sekä piirteistä teollisuudessa. Tutkimuskysymyksen tavoitteena on tuottaa selkeästi tilastoitu vastaus langattomien sensoriverkkojen haasteista teollisissa ympäristöissä.

Asetetun tutkimuskysymyksen pohjalta voidaan myös luoda hypoteesi, jonka avulla tutkimuksen tuloksia voidaan lopuksi pohtia lisää. Katsauksen tavoitteena ei

ole todistaa asetettua hypoteesia oikeaksi tai vääräksi, mutta alustavan hypoteesin avulla voidaan lopuksi pohtia etenkin odottamattomien tulosten perusteella luotuja huomioita ja niiden merkitystä. Hypoteesi on se että teollisuuden käyttökohteet ja sovellukset ovat luonteensa vuoksi erittäin tärkeitä ja oleellisia osia myös arkielämässämme ja sen vuoksi niiltä vaaditaan varmatoimisuutta. Erilaiset ja jopa yksittäiset tuotantolaitosten ongelmat tai raaka-aineiden viivästyneet toimitukset voisivat vaikuttaa hyvinkin nopeasti niin tuotteiden saatavuuteen kuluttajatasolla, mutta myös muissa teollisuuden prosesseissa. Huoltovarmuuteen ja tuotteiden sekä tarvikkeiden saatavuuden takaamiseen pohjautuen teollisuuden prosesseilta ja erilaisilta käyttökohteilta oletettavasti vaaditaan siis merkittävää toimintavarmuutta. Toimintavarmuuden saavuttaminen ei varmasti ole yksinkertaista teollisuudessa joten siihen liittyen odotetaan myös esiintyvä erilaisia haasteita tämän tutkimuksen osalta.

Tutkimuskysymyksen perusteella tuotettavat vastaukset avataan pohdinnan kautta Luvussa 4, jossa niiden merkitystä ja vaikutusta arvioidaan kokonaisuuden kannalta. Kokonaisuuden arvioinnin tavoitteena on ymmärtää kirjallisuudesta selvitettyjen haasteiden esiintymistä realistisissa järjestelmissä ja miten kyseisiä haasteita voidaan tulevaisuudessa vähentää. Tämän tutkimuksen tavoitteena ei kuitenkaan ole muodostaa suosituksia tai konkreettisia ehdotuksia erilaisten haasteiden vähentämiseksi, vaan tulosten perusteella pyritään esittämään mahdollisimman laaja ja puolueeton otanta teollisuuden tarjoamista haasteista langottomien sensoriverkkojen osalta.

2.2 Kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä

Luvussa 2.1 esitettyyn tutkimuskysymykseen vastataan hyödyntäen laajan ja systemaattisen tuloksen tuottavaa tutkimusmenetelmää. Kysymykseen "Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langottomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?" vastataan tuottamalla kirjallisuuteen kohdistuva katsaus. Tässä luvussa esitellään systemaattinen kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä ja itse tutkimuskysymykseen vastaukset tuottava kirjallisuuskatsaus vaiheineen sekä siihen liittyvät tulokset esitellään Luvussa 3.

Tässä tutkimuksessa hyödynnetään systemaattista kirjallisuuskatsausta (SLR, Systematic Literature Review) joka on sekundääritutkimuksen muoto, jolla pyritään

tutkimaan ja hyödyntämään aikaisemmin tuotettua kirjallisuutta sekä tutkimuksia. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen pohjalla on aina vähintään yksi tutkimuskysymys, johon kyseinen kirjallisuuskatsaus pyrkii vastaamaan, joten kirjallisuuskatsaus tulee suunnitella ja kohdentaa mahdollisimman tarkasti asetettujen kysymysten ympärille. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus hyödyntää nimensä mukaisesti järjestelmällisiä ja tarkkaan määriteltyjä metodeja tiedon keräämiseksi, sekä tulosten muodostamiseksi ja analysoimiseksi [108].

Tämän tutkimuksen tuottama kirjallisuuskatsaus pohjautuu ohjekehykseen, jonka Petersen et al. [170] julkaisivat alun perin vuonna 2008. Kyseinen ohjekehys sai vuonna 2015 päivityksen, jossa Petersen et al. [171] ehdottivat vuosien varrella kertyneitä parannuksia ja muita huomioita kirjallisuuskartoituksen toteuttamiseen. Kyseinen kehys pyrkii tarjoamaan selkeän, johdonmukaisen ja toistettavan prosessin systemaattisen kirjallisuuskartoituksen (SMS, Systematic Mapping Study) suorittamiseen erityisesti ohjelmistotuotannon (SE, Software Engineering) aihepiirien parissa. Kehys ja sen kuvaama prosessi on muotoiltu kirjallisuuskartoituksen suorittamiseen, mutta sitä voidaan hyödyntää laajasti myös erilaisten kirjallisuuskatsauksien pohjana.

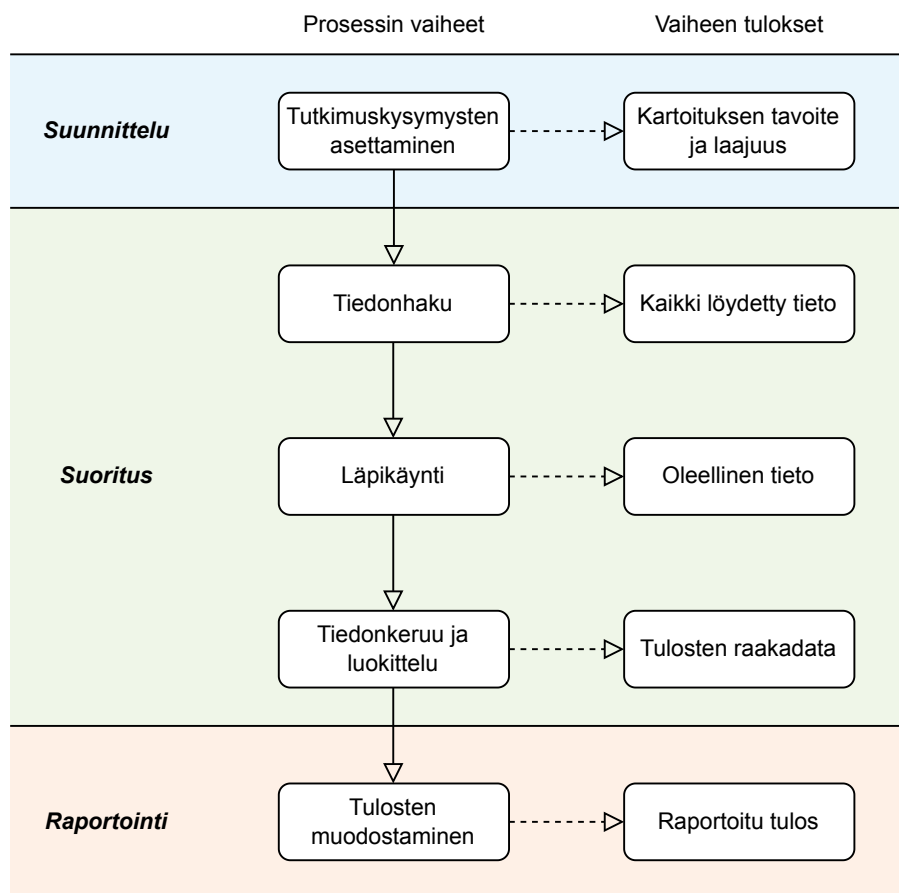
Kirjallisuuskatsauksen ja -kartoituksen voi usein erottaa toisistaan arvioimalla niiden tavoitteellista laajuutta. Erottaviksi tekijöiksi katsauksen ja kartoituksen osalta Kitchenham ja Charters [108] mainitsevat erot laajuudessa tutkimuskysymysten, tiedonhankinnan, sekä tulosten muodostamisen ja analysoinnin välillä. Kartoitus on siis katsaukseen verrattuna huomattavasti laajempi asetettujen kysymysten ja analysoitavan tiedon osalta. Katsaus puolestaan pyrkii kohdentamaan kysymykset ja hankittavan tiedon määrällisesti kapeammalle, mutta usein paljon syvemmälle tasolle kartoitukseen verrattuna.

2.3 Kartoitusprosessi

Tässä aliluvussa esitellään lyhyesti Petersen et al. [170] muotoilema prosessi systemaattisen kirjallisuuskartoituksen suorittamiseksi ohjelmistotuotannon aihepiireissä. Esiteltävä prosessi tarjoaa selkeän pohjan ja rakenteen myös kirjallisuuskatsauksen suorittamiseen tämän tutkimuksen osalta joka on tarkemmin esitelty Luvussa 3.

Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen prosessi voidaan jakaa viiteen erilliseen osaan, joista jokaisen suorittaminen edistää kartoitusta kohti tavoiteltua lopputulos-

ta. Kartoitus aloitetaan aina suunnittelulla, jonka avulla tutkija asettaa tavoitteet ja suunnan kartoituksen suorittamiselle. Suunnittelun ja tavoitteiden asettamisen jälkeen siirrytään kartoituksen suorittamiseen, johon sisältyy tiedon hankintaa, karsimista sekä tulkintaa. Tavoitteita vastaavan tiedon keräämisen jälkeen prosessi päättyy tulosten muodostamiseen, analysointiin ja raportointiin. Kuvassa 2.1 on esitetty systemaattisen kirjallisuuskartoituksen vaiheet Petersen et al. [170] esittelemää prosessia mukaillen.



Kuva 2.1: Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen prosessi.

Prosessissa on ensimmäisenä askeleena esitetty tutkimuskysymysten asettaminen joka siis tiivistää kartoituksen suunnitteluvaiheen yhteen selkeään tavoitteeseen. Tutkimuskysymysten asettamiseen vaaditaan usein myös riittävä ymmärrys tutkittavan aiheen taustoista tai vähintään selkeästi kohdennettu tarve kartoituksen suorittamiselle, mutta tässä prosessissa niitä ei ole eritelty omiksi vaiheiksi. Tutki-

muskysymysten asettamisen jälkeen tutkijalla tulisi olla selkeä tavoite ja ymmärrys kartoituksen laajuudesta tiedon hankinnan aloittamiseksi.

Tutkimuskysymyksiä asettamisen jälkeen tutkija voi aloittaa kartoituksen suoritusvaiheen. Kuvassa 2.1 esitetty suoritusvaihe koostuu kolmesta askeleesta. Suoritusvaiheen ensimmäisenä askeleena suoritetaan tutkimuskysymyksiin ja tavoiteltuun laajuuteen perustuva tiedonhankinta. Tämän askeleen tavoitteena on siis löytää kaikki kartoituksessa hyödynnettävät tiedot jotka vastaavat asetettuja tavoitteita ja rajoitteita. Tässä vaiheessa on hyvin luonnollista löytää myös paljon tutkittavan aiheen sivuavaa tietoa, mutta prosessin seuraava vaihe pyrkii karsimaan kartoituksen kannalta merkityksettömät tiedot pois. Alustavan tiedonhankinnan tuloksena saadaan siis laajuudesta riippuen paljon tietoa, josta osa tullaan vielä karsimaan pois.

Suoritusvaiheen toisessa vaiheessa keskitytään aikaisemmin löydetyn tiedon arviointiin. Arviointi usein tarkoittaa tiedon läpikäyntiä ja sen vertaamista asetettuihin kriteereihin. Kriteerien avulla voidaan määrittää perusteet tiedon hylkäämiselle tai hyväksymiselle erilaisin ehdoin, jolloin myöhempiin tuloksiin sisällytetään vain oleelliset löydökset. Kriteerit voivat perustua esimerkiksi tiedon julkaisumuotoon tai selkeään mainintaan jostain aiheesta. Kriteerien perusteella läpikäytävä tieto pitäisi pystyä joko hyväksymään tai hylkäämään kartoituksen tuloksista. Tämän vaiheen tuloksena syntyy kokoelma kartoituksen kannalta oleellista tietoa, jota seuraavassa vaiheessa aletaan analysoida tarkemmin.

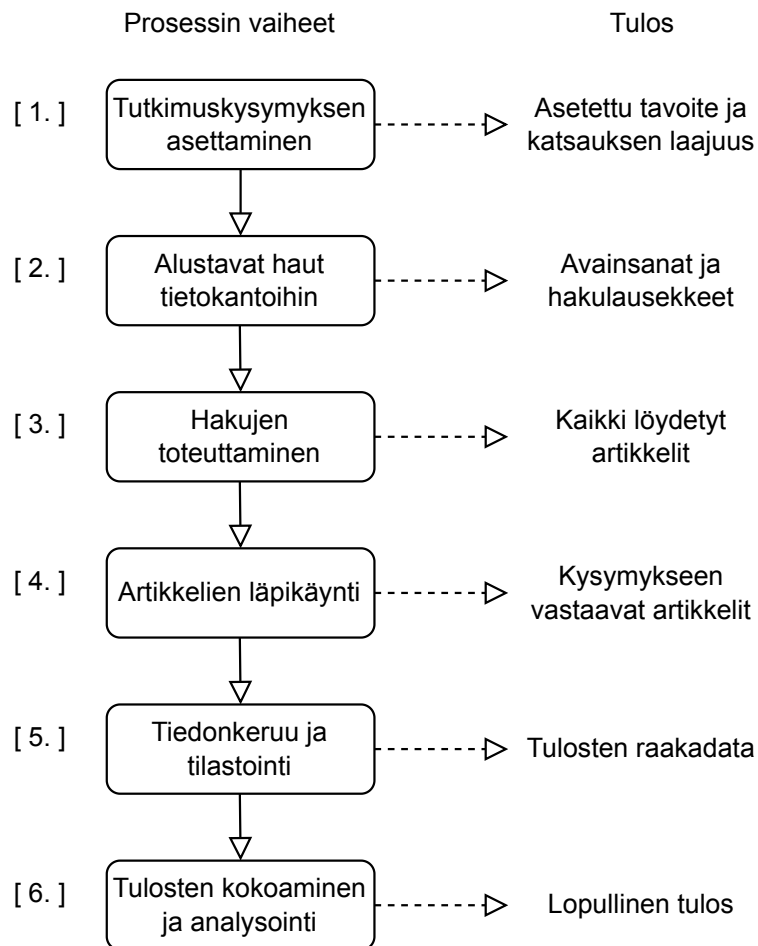
Suoritusvaiheen kolmas askel keskittyy kriteerien avulla suodatetun oleellisen tiedon käsittelyyn. Tiedon käsittelyn tavoitteena on poimia kaikki oleelliset asiat, joiden perusteella voidaan myöhemmin muodostaa lopulliset tulokset kartoitukselle. Tavoitteena on löytää yhteyksiä ja eroja valittujen tietojen osalta jolloin kaikki tieto voidaan esimerkiksi kategorisoida tuloksissa selkeästi. Tämä vaihe voi olla myös tulosten muodostamisen kanssa iteratiivinen prosessi, sillä alustavien tulosten muodostaminen saattaa antaa tutkijalle lisää ideoita tarkastelun kohdistamisesta tiettyihin artikkeleihin ilmeneviin asioihin.

Kartoituksen viimeisen suoritusvaiheen jälkeen voidaan suorittaa lopullisten tulosten muodostaminen. Tässä vaiheessa tutkija tukeutuu aikaisemmin keräämäänsä tiedosta tehtyihin huomioihin ja pyrkii niiden avulla luomaan tutkimuskysymyksiin vastaavia tuloksia. Tulokset voidaan esittää esimerkiksi kaksiakselisessa kartassa, jolloin jopa tuhansista artikkelista kerätty tieto saadaan visualisoitua selkeästi tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi. Tulosten esittämisessä ei ole määrät-

tyä hyvää tai huonoa tapaa, mutta tulosten esittäminen laadukkaasti tarjoaa aina selkeimmät vastaukset myös lukijalle.

3 Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa esitetään suoritettu kirjallisuuskatsaus ja siihen liittyvät vaiheet sekä tulokset. Kirjallisuuskatsauksen hyödyntämistä tutkimusmenetelmänä on avattu Luvussa 2.2 ja tässä luvussa esitetty sisältö perustuu vahvasti kyseisessä luvussa esitettyyn prosessiin. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on vastata Luvussa 2.1 esitettyyn tutkimuskysymykseen "Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?".



Kuva 3.1: Suoritetun kirjallisuuskatsauksen prosessi.

Kuvassa 3.1 on esitetty tässä luvussa läpikäytävän kirjallisuuskatsauksen prosessi. Aliluvussa 3.1 esitetään alustavan tiedon ja kirjallisuuden löytämiseen hyödynnettävät hakutermit sekä -lausekkeet. Aliluku 3.2 kuvaa suoritettua hakuprosessia ja Aliluvussa 3.3 esitetään oleellimmalla tiedon poimintaan keskittyvät toimenpiteet. Lopuksi Aliluvussa 3.4 esitellään kirjallisuuskatsauksen tuottamat tulokset ja niiden merkitys tutkimuskysymyksen suhteen.

3.1 Hakustrategia

Kirjallisuuskatsaus aloitetaan tutkimuskysymyksen asettamisella, jonka jälkeen tutkimuksessa suoritetaan hakusanojen ja -lausekkeiden alustavaa hahmottelua lopullisen tiedonhaun kohdentamiseksi. Tiedonhaun tuloksena tavoitellaan täsmällistä tutkimuskysymykseen vastaavaa aineistoa, jonka avulla voidaan muodostaa selkeitä ja toistettavia tuloksia. Tietokantoihin tehtävien hakujen tavoitteena oli löytää teollisuudessa käytettäviä langattomia sensoriverkkoja käsitteleviä artikkeleita ilman tarkempia rajoituksia esimerkiksi eri alojen perusteella.

Tietokantoihin suoritettua hautausta toteutettiin suodattamalla tietokannoissa tarjolla olevia artikkeleita alustavasti otsikon mukaan. Kaikkiin käytettyihin tietokantoihin suoritettavat hautaukset poimivat vain artikkelit joiden otsikossa mainitaan termit "industrial wireless sensor networks". Artikkeleiden rajaaminen otsikon mukaan osoittautui tehokkaaksi keinoksi löytää selkeästi tutkittavaa aihetta käsitteleviä artikkeleita, eikä hakuehtojen lisääminen sen vuoksi ollut tarpeellista.

Ainoana poikkeuksena käsiteltiin IEEE-tietokantaan kohdistuva haku, joka vaati haun rajaamista hieman tarkemmin muihin tietokantoihin verrattuna. Syynä IEEE-tietokannan lisärajoituksiin oli pelkän otsikon mukaan toteutettua haun tuottamien tulosten runsas lukumäärä. Siinä pelkästään otsikon avulla suoritettu haku tuotti yli neljäsataa tulosta, joka koettiin tämän kartoituksen osalta liian suureksi. Hakua tarkennettiin muutamilla avainsanoilla, joiden avulla tulokset saatiin karsittua lukumäärällisesti maltillisemmaksi. IEEE-tietokannan osalta siis tarkasteltiin otsikkoa kuten kaikissa muissakin hauissa, mutta sen lisäksi tarkasteltiin myös artikkeleiden metadatasia. Hakulauseke tässä tapauksessa vaati, että metadatasista löytyy vähintään yksi avainsana joukosta "industrial OR industry OR iiot OR iwsn" sekä yksi avainsana joukosta "problem OR challenge OR limitation". Lopullisia tuloksia IEEE-tietokannasta saatiin esitetyllä hakulausekkeella yhteensä 168 kappaletta.

Käytetyt tietokannat ja niihin kohdistuvat hakulausekkeet sekä saatujen tulos-

ten määrät on esitetty tarkemmin Taulukossa 3.1. Taulukon esittämät haut suoritettiin yliopiston tarjoamien käyttöoikeuksien rajoissa ja hakujen toistaminen toisilla oikeuksilla tai toisena ajankohtana saattaa tuottaa eri määrän tuloksia.

Taulukko 3.1: Tietokantoihin suoritettut haut.

Tietokanta	Tuloksia	Suoritettu haku
IEEE	168	((("Document Title": industrial wireless sensor networks) AND ("All Metadata": industrial OR industry OR iiot OR iwsn) AND ("All Metadata": problem OR challenge OR limitation))
ACM	18	((Title: industrial wireless sensor networks))
SpringerLink	28	((Title: industrial wireless sensor networks))
MDPI	35	((Title: industrial wireless sensor networks))
arXiv	11	((Title: industrial wireless sensor networks))

3.2 Hakuprosessi

Kirjallisuuskatsauksen hakuprosessi tiivistyy Kuvan 3.1 vaiheissa "3. Hakujen toteuttaminen" ja "4. Artikkelien läpikäynti". Vaiheessa kolme suoritetaan ensin Luvussa 3.1 esitetyn Taulukon 3.1 mukaiset haut tietokantoihin hyödyntämällä esitettyjä hakulausekkeita. Hakustrategian mukaisesti saatuja tuloksia ei rajoiteta enempää esimerkiksi tiedostoformaatin tai julkaisuvuoden perusteella vaan kaikki löydetty tieto otetaan mukaan Kuvan 3.1 vaiheessa neljä esitettyyn läpikäyntiin.

Tietokannoista saatujen tulosten läpikäynnin (Kuva 3.1, vaihe 4.) tavoitteena on karsia pois artikkelit jotka eivät vastaa asetettuun tutkimuskysymykseen. Tietokantoihin suoritettut haut saattavat tuottaa tuloksia jotka täyttävät käytetyn hakulausekkeen ehdot, mutta eivät kuitenkaan käsittele rajattua aihetta tai ovat muulla tavoin arviointiin sopimattomia. Tämän katsauksen osalta ei ole määritetty erillisiä Aliluvussa 2.3 mainittuja hyväksymis- ja hylkäämiskriteereitä, sillä tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman laaja ja rajaamaton kuva tutkittavasta ongelmasta. Ainoana selkeänä artikkelin hylkäämiskriteerinä voidaan pitää sitä, että artikkelin tarjoama tieto on niin marginaalista ettei sitä voida yleistää tutkimuskysymykseen vas-

taavaksi, mutta katsauksen tavoitteena on kuitenkin löytää jokaisesta arvioitavasta julkaisusta vastauksia.

Artikkelien läpikäynnin aikana suoritetaan samalla myös tiedonkeruuta ja tilastointia (Kuva 3.1, vaihe 5.) sillä kartoituksen kannalta on luonnollista, että artikkelin läpikäynnin aikana siitä myös kerätään talteen tarvittavat tiedot.

Tietokantoihin suoritettujen hakujen tuottamat määrälliset tulokset esiteltiin Taulukossa 3.1, mutta kaikki alustavasti löydettyt artikkelit eivät kuitenkaan päätyneet lopullisiin tuloksiin asti jotka ovat esitetty Taulukossa 3.3. Tietokannoista hakujen avulla löydettyt artikkelit olivat sisällöltään hyvin tutkimuskysymykseen vastaavia joten laadullisesta näkökulmasta yhtään artikkelia ei tarvinnut jättää tuloksista pois.

Kokonaisuudessaan kaikkien tietokantojen hakujen avulla löydettyistä artikkeleista jouduttiin jättämään pois kahdeksan kappaletta ja artikkelien pois jättämiseen on tässä tapauksessa hyvin luonnollinen selitys. Kaikista artikkeleista yhteensä seitsemän löytyi kahdesta eri tietokannasta, mikä usein johtuu siis siitä että artikkeleita voidaan julkaista useamminkin tietokannoissa ja julkaisualustoilla. Nämä seitsemän artikkelia kuitenkin päätettiin sisällyttää tuloksiin vain kertaalleen jotta tuloksissa ei esiintyisi epätasapainoa artikkelien vaikutuksen osalta. Lisäksi yksi artikkeli jouduttiin jättämään pois lopullisista tuloksista, sillä kyseessä oli tietokannan haussa löytynyt kirjaa koskeva julkaisu-uutinen, eikä kyseessä siis edes ollut vastauksia tutkimuskysymykseen tarjoava artikkeli lainkaan.

Kokonaisuudessaan siis kahdeksan alustavien hakujen avulla löydettyä artikkelia jätettiin lopullisten tulosten ulkopuolelle. Kaikki tuloksissa esiintyvät artikkelit ja niiden lukumäärät ovat listattuna tietokannoittain Taulukossa 3.2. Tuloksissa siis IEEE-tietokannan tuottaman haun tulokset (160 kpl) kattavat suurimman osan arvioitavien artikkelien kokonaismäärästä, mutta myös muut tietokannat kokonaisuudessaan ($18+28+35+11=92$ kpl) tarjoavat merkittävän otannan kokonaistuloksissa.

Taulukko 3.2: Tuloksissa käytetyt artikkelit tietokannoittain.

Tietokanta	Arvioitavia artikkeleita	Artikkelit
IEEE	160	[21, 92, 90, 179, 260, 224, 127, 35, 212, 95, 28, 251, 80, 44, 196, 111, 182, 266, 159, 22, 48, 235, 42, 257, 271, 18, 68, 253, 12, 262, 169, 9, 149, 113, 190, 134, 164, 130, 77, 101, 254, 75, 141, 246, 126, 209, 133, 166, 165, 45, 229, 41, 195, 237, 167, 181, 55, 69, 129, 54, 198, 27, 81, 5, 117, 147, 189, 242, 139, 122, 14, 131, 83, 211, 277, 98, 180, 60, 136, 65, 244, 272, 267, 43, 143, 29, 11, 148, 102, 39, 172, 210, 78, 71, 135, 61, 138, 192, 124, 250, 67, 93, 232, 223, 32, 263, 213, 200, 160, 19, 79, 49, 228, 115, 173, 270, 236, 56, 191, 59, 137, 46, 109, 51, 70, 50, 142, 238, 205, 146, 256, 107, 161, 163, 120, 91, 20, 162, 185, 154, 153, 23, 13, 268, 24, 99, 243, 30, 204, 114, 177, 26, 34, 1, 100, 74, 73, 194, 140, 6]
ACM	18	[176, 184, 187, 31, 225, 202, 156, 245, 199, 7, 33, 265, 94, 197, 203, 273, 152, 150]
Springer	28	[110, 10, 103, 125, 119, 269, 118, 206, 261, 47, 63, 97, 215, 132, 123, 278, 216, 25, 151, 62, 227, 258, 112, 249, 217, 193, 252, 168]
MDPI	35	[64, 57, 106, 259, 58, 145, 178, 104, 214, 175, 40, 144, 234, 128, 121, 239, 53, 105, 4, 231, 264, 255, 188, 158, 96, 221, 226, 233, 2, 38, 230, 241, 240, 174, 220]
arXiv	11	[3, 247, 183, 248, 219, 276, 274, 222, 116, 52, 275]

3.3 Tiedon poiminta

Tiedon poiminta on oleellinen osa jo kirjallisuuskatsauksen aikana suoritettavaa artikkelien läpikäyntiä. Tiedon poiminta on esitetty Kuvan 3.1 viidennessä vaiheessa. Tiedon poiminnan tavoitteena on kerätä ja tilastoida tutkimuskysymykseen vastaamiseen tarvittavat tiedot artikkeleista. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tiedot on kerätty artikkelikohtaisesti taulukkoon jolloin lopullisten tulosten muodostaminen ja analysointi on mahdollisimman helppoa.

Läpikäydyistä artikkeleista kerätään talteen kaikki tutkimuskysymykseen vastauksia antavat tiedot. Kaikki artikkelissa mainitut ongelmat, rajoitteet ja haasteet liittyen langattomien sensoriverkkojen hyödyntämiseen teollisissa ympäristöissä tilastoidaan tiedot keräävään taulukkoon. Osa artikkeleista saattaa tarjota lukuisia vastauksia kun taas osa saattaa mainita vähemmän ongelmia, rajoitteita tai haasteita artikkelin aihepiiristä ja luonteesta riippuen. Artikkelit saattavat olla luonteeltaan ja rakenteeltaan hyvinkin erilaisia joista osa saattaa suoraan käsitellä erilaisia ongelmia kun taas osa pyrkii esittelemään jotain uusia ratkaisuja ongelmien ratkaisemiseksi. Tulosten laadun takaamiseksi on oleellista että artikkeleissa annetut vastaukset tilastoidaan sellaisenaan ja että tulosten yhteenveto sekä tarkempi kategorisointi suoritetaan vasta lopullisia tuloksia muodostettaessa. Lopulliset tulokset ja niiden analysointi on esitetty Luvussa 3.4.

3.4 Kirjallisuuskatsauksen tulokset

Kirjallisuuskatsauksen viimeisenä vaiheena (Kuva 3.1, vaihe 6.) esitetään ja analysoidaan kerätyjä tuloksia ja arvioidaan niiden vaikutusta tutkimuskysymyksen asettaman tavoitteen suhteen. Vastauksien kerääminen artikkeleista oli sinällään suoraviivainen prosessi, mutta lopullisia tuloksia analysoitaessa voidaan havaita muutamia mielenkiintoisia ilmiöitä artikkelien erilaisuuksista johtuen. Mielenkiintoisimmat ilmiöt liittyivät erilaisiin mainintoihin (ongelmat, haasteet ja rajoitteet) ja niiden tulkitsemiseen artikkelien välillä.

Tästä esimerkkinä toimii se että osa artikkeleista mainitsee ongelmana kommunikaation odottamattomat viiveet, kun taas osa artikkeleista saattaa mainita puutteet kommunikaation reaaliaikaisuudessa. Artikkelien osalta voikin siis olla tulkinanvaraista se, että tarkoitetaanko edellä mainituilla ongelmilla käytännössä samaa asiaa vai tulisiko ne käsitellä kahtena täysin eri ongelmana. Shin ja Ramanat-

han [201] määrittelevät reaaliaikaisen tietojenkäsittelyn (RTC, Real-time computing) koostuvaksi kolmesta oleellisesta komponentista jotka ovat ajantasaisuus, luotettavuus sekä ympäristö. Reaaliaikaisen järjestelmän tulee siis aina reagoida ja toimia asetetuissa aikarajoissa ilman vikatilanteita ja vikaantuessaankin sen tulee toimia odotetulla tavalla. Reaaliaikaisuus vaatii lisäksi sitä tukevan ympäristön, joten kaikkien laitteiden komponenttien kuten myös hyödynnettävän käyttöjärjestelmän ja ajettavan ohjelmakoodin tulee täyttää järjestelmän vaatimukset reaaliaikaisuuden suhteen. Maininnat kommunikaation odottamattomista viiveistä kuitenkin tarkoittaa sitä että aina reaaliaikaisuus ei ole välttämätöntä, mutta yleisemmällä tasolla kommunikaation viiveet ovat silti ongelma. Voidaan siis todeta että reaaliaikaisuuden haasteeseen yleensä myös kommunikaation viiveet, mutta kommunikaation odottamattomiin viiveisiin ei välttämättä aina liity reaaliaikaisuuden haasteet.

Kirjallisuuskatsauksen tuottamat tulokset on kokonaisuudessaan esitetty Taulukossa 3.3 ja oleellisimpia vastauksia avataan lisää tulokset esittävän taulukon jälkeisessä osiossa. Esiintyneiden haasteiden merkitystä ja tyypillisiä ilmenemisiä esitellään lisää Aliluvussa 3.5 erilaisten esimerkkien avulla. Luvussa 4 pohditaan lisää erilaisten haasteiden merkitystä erityisesti asetetun tutkimuskysymyksen suhteen.

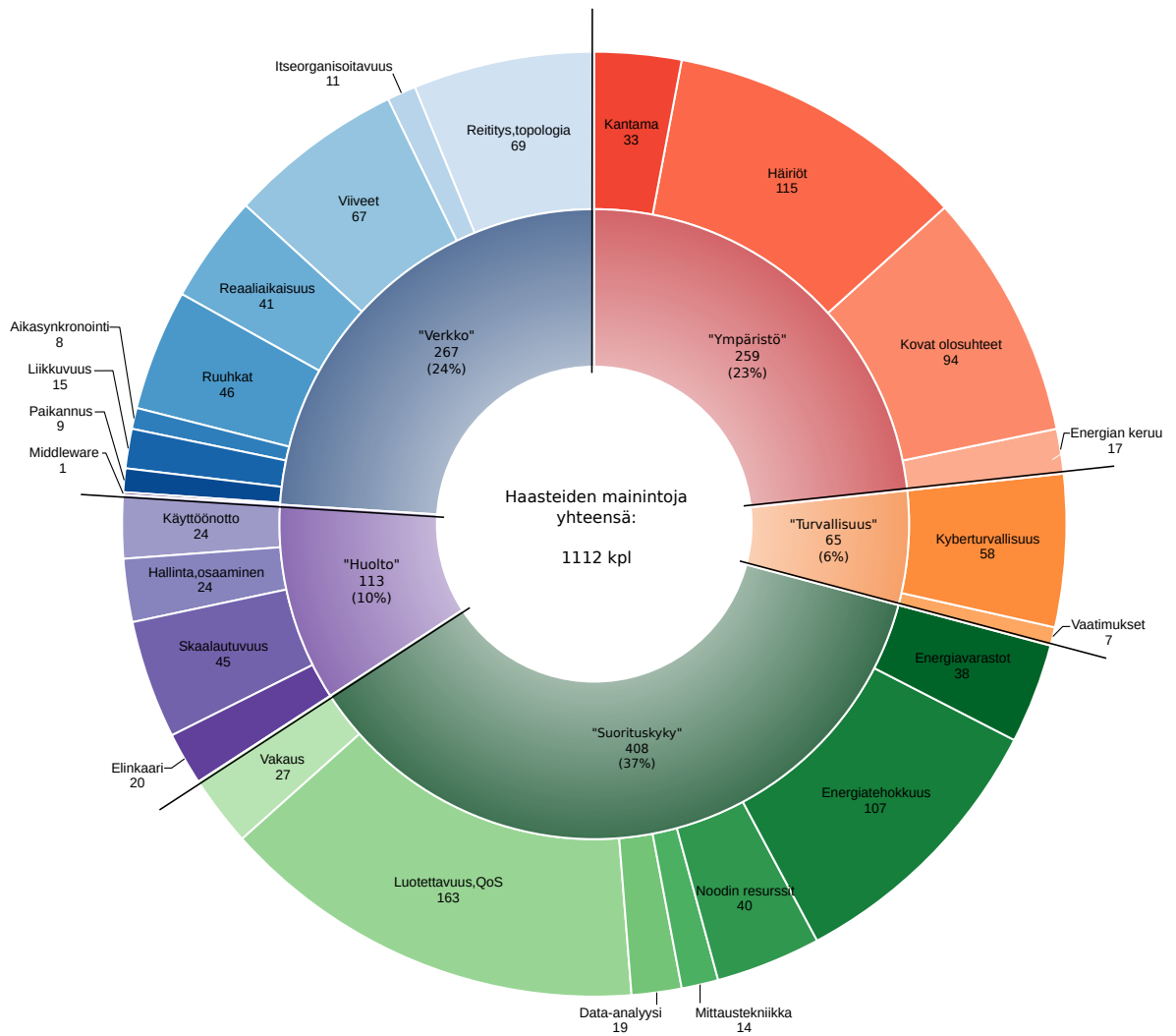
Taulukko 3.3: Kirjallisuuskatsauksen tulokset. Sarakkeissa haasteen mainintojen määrä tietokantakohtaisesti, suluissa lukumäärän osuus tietokannan artikkeleista.

Haaste	IEEE[84]	ACM[8]	Springer[208]	MDPI[155]	arXiv[37]
<i>Verkko</i>					
Reititys, topologia	41 (26%)	7 (39%)	7 (25%)	7 (39%)	7 (64%)
Itseorganisoitavuus	8 (5%)	0	0	3 (9%)	0
Viiveet	37 (23%)	4 (22%)	9 (32%)	13 (37%)	4 (36%)
Reaaliaikaisuus	25 (16%)	5 (28%)	5 (18%)	6 (17%)	0
Ruuhkat	29 (18%)	3 (17%)	7 (25%)	5 (14%)	2 (18%)
Aikasynkronisointi	3 (2%)	0	0	4 (11%)	1 (9%)
Liikkuvuus	10 (6%)	0	2 (7%)	3 (9%)	0
Paikannus	4 (3%)	0	3 (11%)	2 (6%)	0
Middleware	1 (1%)	0	0	0	0
<i>Huolto</i>					
Käyttöönotto	15 (9%)	3 (17%)	3 (11%)	1 (3%)	2 (18%)
Hallinta,osaaminen	16 (10%)	1 (6%)	2 (7%)	3 (9%)	2 (18%)
Skaalautuvuus	31 (19%)	2 (11%)	8 (29%)	3 (9%)	1 (9%)
Elinkaari	13 (8%)	0	6 (21%)	0	1 (9%)
<i>Suorituskyky</i>					
Vakaus	23 (14%)	0	1 (4%)	3 (9%)	0
Luotettavuus,QoS	107 (67%)	8 (44%)	17 (61%)	25 (71%)	6 (55%)
Data-analyysi	11 (7%)	1 (6%)	3 (11%)	4 (11%)	0
Mittaustekniikka	7 (4%)	0	2 (7%)	2 (6%)	3 (27%)
Noodin resurssit	23 (14%)	1 (6%)	7 (25%)	7 (20%)	2 (18%)
Energiatehokkuus	70 (44%)	8 (44%)	13 (46%)	12 (34%)	4 (36%)
Energiavarastot	22 (14%)	3 (17%)	5 (18%)	3 (9%)	5 (45%)
<i>Turvallisuus</i>					
Vaatimukset	3 (2%)	1 (6%)	2 (7%)	0	1 (9%)
Kyberturvallisuus	36 (23%)	3 (17%)	7 (25%)	8 (23%)	4 (36%)
<i>Ympäristö</i>					
Energian keruu	13 (8%)	2 (11%)	0	0	2 (18%)
Kovat olosuhteet	46 (29%)	8 (44%)	14 (50%)	22 (63%)	4 (36%)
Häiriöt	73 (46%)	8 (44%)	13 (46%)	15 (43%)	6 (55%)
Kantama	27 (17%)	0	2 (7%)	2 (6%)	2 (18%)

Taulukossa 3.3 on esitetty kirjallisuuskatsauksen tulokset ja esiintyneet haasteet. Taulukko jakaantuu riveittäin erilaisiin haasteisiin ja sarakkeittain tutkittuihin tietokantoihin. Katsauksen tuottamat tulokset on jaettu yhteensä 26:een erilaiseen haasteeseen, jotka on selkeyttämisen vuoksi myös jaoteltu yhteensä viiteen eri kategoriaan. Valikoidut kategoriat ovat: verkko, huolto, suorituskyky, turvallisuus ja ympäristö, joihin kaikkiin sisältyy siis useita yksittäisiä haasteita. Haasteiden jakaminen eri kategorioihin ei millään tavalla ole vaikuttanut tuloksiin eikä kategori-aa tarvitse ymmärtää mitenkään rajoittavana tekijänä esimerkiksi haasteen esiintymisen suhteen. Esimerkiksi reaaliaikaisuuteen liittyvät haasteet voivat ilmetä monella eri tavalla kuten noodien välisessä kommunikaatiossa, mutta myös esimerkiksi yksittäisen noodin ohjelmakoodin tasolla. Reaaliaikaisuuden haasteet voisivat siis yhtä hyvin olla sijoitettuna paitsi haasteiden verkko-kategoriaan, mutta myös suorituskyky-kategoriaan. Haasteet voitaisiin siis jaotella näihin viiteen tai vaikka useampaankin kategoriaan monin eri tavoin, mutta oleellista kuitenkin on ettei tässä ilmoitettu kategoria vaikuta kokonaistuloksiin.

Taulukon jokaisessa solussa on kaksi eri arvoa. Ensimmäinen arvo on haasteen ilmentymisen lukumäärä kyseisen sarakkeen mainitussa tietokannassa. Toinen ilmoitettu arvo joka löytyy sulkujen sisältä, on lukumäärän prosentuaalinen osuus kaikista kyseisen tietokannan artikkeleista. Esimerkiksi "reititys, topologia" rivillä tarkastellaan saraketta "IEEE" josta löytyy arvo: "41 (26%)". Tämä arvo siis tarkoittaa että IEEE-tietokannan arvioiduista artikkeleista yhteensä 41 kappaletta mainitsi tai käsitteli reititykseen tai topologiaan liittyviä haasteita ja että nämä 41 artikkelia edustaa yhteensä noin 26 prosenttia kaikista (160 kpl) IEEE-tietokannan arvioiduista artikkeleista ($41 / 160 = \sim 26\%$).

Kuvassa 3.2 on esitetty Taulukon 3.3 esittämät tulokset visuaalisessa muodossa. Kuvan 3.2 diagrammin sisemmällä kehällä on esitetty haasteiden maininnat kategorioittain kokonaisuudessaan. Sisemmällä kehällä on jokaisessa lohossa esitetty kategorian nimi, mainintojen lukumäärä ja kategorian mainintojen lukumäärän prosentuaalinen osuus kaikista käsitellyistä maininnoista. Diagrammin ulommalla kehällä on puolestaan esitetty kaikki Taulukon 3.3 mainitsevat haasteet yksityiskohtaisemmin ja jokaisen haasteen kohdalla on myös esitetty kyseisen haasteen keräämien mainintojen lukumäärä. Ulkokehää tarkastellessa on visuaalisesti helppo erottaa yksittäisten haasteiden laajuus ja merkittävyys sekä verrata haasteita keskenään. Haasteita ja niiden mahdollisia esiintymismuotoja kuvataan tarkemmin Luvussa 3.5.



Kuva 3.2: Kirjallisuuskatsauksen tulokset visualisoituna.

Taulukossa 3.4 on puolestaan esitetty erilaisiin langattomiin sensoriverkkoihin liittyvien teknologioiden esiintyminen arvioiduissa artikkeleissa. Teknologioihin liittyvät tulokset ovat kerätty suorittamalla artikkeleihin Taulukossa 3.4 esitettyjä termejä. Taulukossa on esitetty, siis monessako artikkelissa jokainen esitetty teknologia on mainittu. Taulukon tulokset eivät välttämättä kerro aukottomasti mitkä teknologiat kärsivät suurimmista haasteista, mutta tuloksista saadaan kuitenkin melko hyvä käsitys yleisimmin käsitellyistä teknologioista. Tuloksista on myös hyvä huomioida teknologioiden osittainen päällekkäisyys. Esimerkiksi WirelessHART (Wireless Highway Addressable Remote Transducer Protocol), ISA100 (International Society of Automation), ZigBee, 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) ja WIA-PA (Wireless Networks for Industrial Automation and Process Automation) kaikki perustuvat pohjimmiltaan 802.15.4 -standardiin, joten tulosten kannalta on hyvin luonnollista että 802.15.4 myös itsessään keräsi paljon mainintoja. Lisäksi LR-WPAN (low-rate wireless personal area network) voidaan ymmärtää synonyyminä "802.15.4" termille ja ISM (Industrial, Scientific and Medical) kuvaa yleisimmin ITU:n (International Telecommunication Union) määrittelemiä [89] lisensivapaita, mutta kuitenkin säädeltyjä taajuusalueita erilaisten langattomien laitteiden ja tieteenalojen käyttöön. Tuloksia analysoitaessa on myös hyvä ymmärtää että kaikki artikkelit eivät välttämättä erityisesti maininneet mitään taulukossa ilmenyttä teknologiaa, vaan osa artikkeleista saattoi käsitellä haasteita myös puhtaasti teoreettisella tasolla.

Tuloksia analysoitaessa voidaan kuitenkin esittää muutamia tiedostamisen arvoisia huomioita. Ensimmäisenä on hyvä tiedostaa 802.15.4 -standardin levinneisyys ja laajakäsitteisyys langattomien sensoriverkkojen osalta teollisuuden parissa. Lukuisat 802.15.4 -pohjaiset teknologiat tarjoavat jo teollisuuden käyttöön sopivia teknologioita joten voidaan myös tehdä olettamus siitä että siihen pohjautuvia teknologioita tullaan tulevaisuudessa näkemään myös lisää. Toisena huomiona tuloksista voidaan tehdä myös olettamus että esimerkiksi vähemmän mainintoja keränneet LoRa (Long Range) ja Sigfox eivät välttämättä ole kaikissa teollisuuden ympäristöissä kovinkaan laajasti hyödynnettynä. Vähäisten mainintojen osalta voidaan siis todeta että ehkä nämä teknologiat eivät ole aina sopivia kaikkiin teollisuuden tarpeisiin, mutta niitä saatetaan hyödyntää paljon laajemmin vähemmän kriittisissä käyttökohteissa.

Taulukko 3.4: Artikkeleissa ilmenneet maininnat teknologioista. Ensimmäisessä sarakkeessa teknologia ja toisessa sarakkeessa ensin mainintojen lukumäärä ja suluisa lukumäärän osuus kaikista arvioiduista artikkeleista.

Teknologia	Mainintoja yhteensä
802.15.4 [82]	130 (52%)
WirelessHART [85]	86 (34%)
ISA100 [87]	80 (32%)
ZigBee [36]	75 (30%)
ISM [89]	47 (19%)
Bluetooth [16]	41 (16%)
WIA-PA/FA [86]	36 (14%)
LR-WPAN	29 (12%)
6LoWPAN [218]	13 (5%)
LoRa [186]	9 (4%)
Sigfox [207]	2 (1%)

Seuraavaksi käydään läpi lyhyesti tuloksissa esitettyjä merkittävämpiä haasteita ja niiden oleellisuutta. Aliluvussa 3.5 käsitellään sen jälkeen esitettyjen haasteiden merkitystä sekä pyritään esittämään jokaista haastetta koskevia pragmaattisia esimerkkejä, joissa kyseinen haaste voidaan kohdata. Tarkempaa pohdintaa haasteiden merkityksellisyydestä on myöhemmin esitetty Luvussa 4.

Tuloksia tarkastelemalla saadaan selkeä kuva tutkitun kirjallisuuden käsittelemistä langattomien sensoriverkkojen hyödyntämisen ongelmista, rajoitteista ja haasteista osana teollisia ympäristöjä. Asetettuun tutkimuskysymykseen "Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?" voidaan siis käytännössä vastata kaikilla Taulukossa 3.3 esitetyillä kohdilla, mutta vastauksien tarkemmalla analysoinnilla voidaan tuottaa myös hieman tiiviimpiä vastauksia. Kirjallisuuskatsauksen perusteella muutamia oleellimpia ja merkittävämpiä haasteita ovat sensoriverkkojen yleinen luotettavuus, reaaliaikaisuus ja kommunikaation viiveet, sekä sensorinoodien rajoittuneet resurssit ja energiatehokkuus. Seuraavaksi analysoidaan vielä tarkemmin tuloksia ja niiden esittämiä ilmiöitä.

Luotettavuus ja palvelun laatu on tulosten mukaan suurin yksittäinen haaste

ja ongelma langattomien sensoriverkkojen hyödyntämisessä teollisissa käyttötar-koituksissa. Luotettavuus terminä on melko laaja, mutta se tiivistää hyvin yhteen monia pienempiä haasteita. Birolini [15] määrittelee luotettavuuden jonkin asian ominaisuudeksi, jota mitataan kyseisen asian kyvyllä ja todennäköisyydellä suoriutua siltä vaaditusta toimenpiteestä asetetuissa olosuhteissa ja aikamääreissä. Tämä määrittely kuvaa hyvin sensoriverkoilta vaadittavaa luotettavuutta, sillä langattomien sensoriverkkojen vikatilanteet eivät vaaranna luotettavuutta kunhan se vain omaa riittävän kyvyn suoriutua sille tarkoitetuista tehtävistään. Luotettavuus voidaan ymmärtää tutkimuksen aihepiirissä paitsi haasteena, mutta myös tavoitteena. Tulosten perusteella luotettavuus on erittäin oleellinen ominaisuus kaikilla teollisuuden aloilla, mitä voidaan pitää hyvin luonnollisena vastauksena tähän kirjallisuuskatsaukseen. Langattomien sensoriverkkojen luotettavuus on siis myös suoriutuskykyä tärkeämpää erityisesti kriittisimmissä käyttökohteissa kuten esimerkiksi terveydenhuollon tai energiatuotannon- ja jakelun järjestelmissä ja palveluissa.

Reaaliaikaisuus ja yleinen deterministisyys on merkittävä vaatimus mille tahansa järjestelmälle, mutta se ei kuitenkaan tarkoita sitä että reaaliaikaisuutta vaadittaisiin joka järjestelmältä. Kirjallisuuskatsauksen tuloksissa esiintyy merkittävä määrä mainintoja odottamattomiin viiveisiin ja reaaliaikaisuuteen liittyvistä haasteista, joten tulosten ymmärtämisen kannalta on oleellista analysoida eroja näiden kahden edellä mainitun haasteen välillä vaikka ne voidaankin osittain ymmärtää synonyymeinä joissain tapauksissa. Reaaliaikaisuus on kova vaatimus joten siihen liittyvät haasteet ilmenevät todennäköisesti kaikista vaativimmissa olosuhteissa ja järjestelmissä. Kommunikaation odottamattomat viiveet puolestaan kertovat yleisemmällä tasolla esimerkiksi häiriöiden aiheuttamasta epäluotettavuudesta tiedonsiirron suhteen. Reaaliaikaisuuden tarvetta järjestelmässä tulee arvioida erityisesti sen turvallisuuden ja kriittisyyden suhteen. Lu et al. [142] käsittelee erilaisiin teollisten prosessien ohjauksiin keskittyviä langattomia sensori-toimilaitteverkkoja (WSAN, wireless sensor-actuator network), joita voidaan pitää teollisuuden osalta kriittisinä toimintoina. Tapauksissa jossa sensorit tuottavat muita toimilaitteita kuten venttiileitä ohjaavaa dataa ja kommunikoivat keskenään langattomasti tulee reaaliaikaisuuteen kiinnittää erityistä huomiota. Tällaisissa järjestelmissä vikatilanteet ja kommunikaatiokatkokset voivat aiheuttaa merkittävän vaaran tai haitan jos järjestelmä ajautuu odottamattomaan tai muuten vain normaalista poikkeavaan tilaan. Teollisuuden aloilla voi olla myös paljon ei niin kriittisiä käyttökohteita langattomille sensoriverkoille kuten olosuhteiden mittaukset. Tuotanto- ja varastointitilojen olo-

suhdemittaukset eivät yleisesti ole kriittisyydeltään esimerkiksi prosessienohjauksen tasolla, joten niissä reaaliaikaisuutta ei ole tarvetta vaatia. Todettakoon kuitenkin että esimerkiksi logistiikan parissa kylmäkuljetuksiin tai terveydenhuoltoon liittyvät lääkevarastoinnit saattavat asettaa säännöllisten mittausten osalta tarkempia vaatimuksia. Katsauksen tuloksia tarkastellessa voidaan kuitenkin selvästi todeta että sensoriverkojen reaaliaikaisuuteen ja viiveisiin liittyvät haasteet ovat merkittävässä osassa teollisia käyttökohteita.

Langattomat sensoriverkot voivat koostua erilaisista sensoreista, noodeista ja niiden kommunikoinnin mahdollistamista laitteista, mutta ominaista langattomille sensoriverkoille on kuitenkin noodien verrattaen rajoittuneet resurssit. Resurssit ovat rajoittuneet yleensä kolmen ominaisuuden suhteen, jotka ovat käytössä oleva energia, muistin määrä sekä prosessorin laskentateho [72]. Rajoittuneet resurssit eivät varsinaisesti kerro teknologisen kehityksen puutteesta vaan resurssien rajoittuminen on tietoinen kompromissi kustannusten, energiatehokkuuden ja käyttötarkeitusten välillä. Langattomat sensoriverkot nimensä mukaisesti koostuvat langattomasti kommunikoivista noodeista jotka siis myös yleensä saavat käyttövirtansa akusta tai paristoista. Energiatehokkuuden osalta laskentateho on pidettävä minimaalisena sillä tehokkaampien prosessoreiden tai mikrokontrollereiden käyttäminen vaatii aina suuremmat energiavarastot tai noodin käyttöaika on hyvin rajallinen. Rajoittunut laskentateho voi monissa tapauksissa ilmetä ongelmana, mutta laskentatehon ja kontrollereiden ominaisuuksien karsiminen kertoo myös noodien tehokkaasta optimoinnista. Noodin on tarkoitus tarjota vain tarvittavat ominaisuudet ja tehokkuus oman tehtävänsä suorittamiseen jolloin noodin käyttöaika voidaan maksimoida käytössä olevalla energiamäärällä. Kirjallisuuskatsauksen tuloksista kuitenkin ilmenee muutamia selkeitä haasteita noodien resursseihin liittyen. Laskentatehon ja mikrokontrollereiden ominaisuuksien haasteet näkyvät tutkimuksessa tiedossa esimerkiksi salausalgoritmien hyödyntämiseen liittyvinä ongelmina esimerkiksi noodien autentikointiin liittyen. Energiavarastoinnin osalta haasteita ilmeni esimerkiksi energian keräämiseen ja siirtämiseen liittyen. Lisäksi energiatehokkuuden osalta suurimpia haasteita on noodien liikenteen reititys ja siihen liittyvien protokollien kehitys. Haasteena siinä koettiin noodien energiankulutus aktiivisessa, viestejä kuuntelevassa tai lähettävässä tilassa jolloin noodien herättäminen ja kommunikoinnin aikataulut on erittäin oleellista energiatehokkuuden parantamiseksi.

Nämä edellä mainitut haasteet voivat sinällään olla oleellisia haasteita kaikis-

sa langattomia sensoriverkkoja hyödyntävissä käyttökohteissa, ei ainoastaan teollisuuden sovelluksissa. Kirjallisuuskatsauksen tuloksista kuitenkin ilmenee erittäin oleellisia teollisuuteen liittyviä haasteita mitkä eivät välttämättä ole niin merkityksellisiä muissa käyttötarkoituksissa. Tuloksien mukaan ympäristön asettamat haasteet ovat erittäin merkittävä ongelma langattomien sensoriverkkojen hyödyntämiselle teollisuudessa. Ympäristön suurimpia haasteita ovat vaativat olosuhteet sekä erilaiset kommunikaatiota haittaavat häiriöt. Vaativat olosuhteet asettavat haasteita erityisesti sensoriverkon laitteille. Laitteet saattavat altistua esimerkiksi äärimmäisille lämpötiloille, kosteudelle, värinälle tai kemikaaleille, joten pitkän käyttöiän takaamiseksi laitteille asetetaan korkeita vaatimuksia erilaisten ominaisuuksien suhteen. Toinen suuri haaste sensoriverkoille on teollisissa ympäristöissä esiintyvät häiriöt. Häiriöt aiheuttavat ennakoimattomia ongelmia kommunikaation luotettavuuteen ja siten myös koko verkon toimintaan ja myös noodien energiankulutukseen. Häiriöt voivat johtua esimerkiksi erilaisista rakenteista, muista sähkölaitteista tai samoilla taajuuksilla kommunikoivista noodeista.

Teollisissa käyttökohteissa ympäristöä on vaikea optimoida langattoman kommunikaation kannalta täydelliseksi, joten tulosten perusteella voidaan todeta että ympäristö itsessään on yksi merkittävimmistä haasteista langattomien sensoriverkkojen tehokkaan hyödyntämisen kannalta. Ympäristö on käytännössä ainut haaste tuloksissa, johon on hyvin vaikea tehdä merkittäviä parannuksia langattoman kommunikaation kannalta, mutta monia muita tuloksissa mainittuja haasteita voidaan lievittää eri tavoin. Energiatehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi prosessorien ja mikrokontrollereiden tai kommunikaatioprotokollien kehittämällä. Luotettavuutta, kommunikaation viiveitä ja ruuhkia voidaan parantaa esimerkiksi ottamalla käyttöön uusia taajuusalueita tai -kanavia. Kyberturvallisuutta ja noodien analysointiominaisuuksia voidaan parantaa lisäämällä noodien resursseja ja laskentatehoa. Tulokset havainnollistaa kuitenkin parhaiten sen, että langattomat sensoriverkot koostuvat monesta osasta ja erityisesti niiden tasapainoisesta yhdistämisestä. Teollisuuden käyttökohteissa tulee huomioida erittäin tarkasti miten valitsevat olosuhteet vaikuttavat sensoriverkon toimintaan. Ympäristön huomioimisen tulisi dominoida langattomien sensoriverkkojen rakentamista ja hyödyntämistä teollisiin ympäristöihin jo suunnitteluvaiheessa.

3.5 Sensoriverkkojen haasteiden kuvaus

Tässä aliluvussa käydään läpi jokainen tulosten esittämä haaste ja käsitellään lyhyesti niiden mahdollista ilmenemistä erilaisissa käytännön sovelluksissa ja ympäristöissä. Monet käsiteltävät haasteet voivat esiintyä lukuisin eri tavoin sovelluksesta, käyttökohteesta, teknologioista tai tavoitteista riippuen, mutta seuraavana esitetyt ilmentymät ovat esitetty mahdollisimman suoraviivaisina ja yksinkertaisina.

Reititys ja topologia

Reititykseen ja erilaisiin verkon topologioihin liittyvät haasteet ovat yleisesti merkittäviä kaikissa langattomasti kommunikoivissa verkoissa, mutta erityisen merkittäviä ne ovat teollisuuden vaativissa käyttökohteissa. Sensoriverkkojen hyödyntäminen tärkeissä valvonta- ja ohjaussovelluksissa vaatii luotettavaa ja nopeaa tiedonsiirtoa eri laitteiden ja palvelimien välillä, joten käytettävien protokollien ja verkon topologioiden tulee myös vastata niille asetettuihin vaatimuksiin [159]. Protokolliin ja verkon topologiaan liittyvät haasteet saattavat esiintyä yleisimmin verkossa tapahtumien muutosten seurauksena. Tällä voidaan tarkoittaa esimerkiksi noodin vikaantumisen johtuvaa tarvetta pystyä korjaamaan verkon toiminta muuttamalla topologiaa nopeasti. Esimerkkinä Yu et. al [256] ovat pohtineet tähän liittyviä ongelmia ja esittäneet RSSI-arvoihin (Received signal strength) pohjautuvaa reititysprotokollaa, jonka avulla sensoriverkot voisivat reagoida nopeammin verkon muutoksiin ja samalla taata verkon tehokkaan toiminnan.

Itseorganisoitavuus

Itseorganisoitavuus on teknisesti laadukkaan sensoriverkon ominaisuus, jolla parhaimmillaan saavutetaan verkon saumaton toiminta myös monissa vikatilanteissa. Langattoman sensoriverkon omatessa kyky järjestäytyä ja sopeutua verkon muutoksiin antaa sille merkittäviä ominaisuuksia, joilla verkon äkillisiin muutoksiin voidaan reagoida dynaamisesti. Ilman kykyä itseorganisoitua tai reagoida verkon muutoksiin saattaa sensoriverkko joissain tapauksissa lakata toimimasta osittain tai jopa kokonaan. Itseorganisoitavuuden haasteet esiintyvät esimerkiksi noodien vikaantumisen johtuvasta ketjureaktioista, jossa verkko ei välttämättä pysty reagoimaan oikein tapahtuneeseen muutokseen autonomisesti. Itseorganisoitavuudella pystytään paitsi reagoimaan vikatilanteisiin, mutta myös saavuttamaan verkon

tasapainottavia toimintoja. Esimerkiksi Mukherjee et al. [154] esittelevät järjestelmän joka koostuu monipuolisista noodeista, joista osa kykenee keräämään energia ympäristöstä ja osa puolestaan ei siihen pysty. Järjestelmässä energiaa keräävät noodit pystyvät olemaan aktiivisena energian määrästä riippuen jopa jatkuvasti ja käyttämään suurempaa lähetystehoja kuin noodit jotka eivät kykene keräämään energiaa. Järjestelmästä ilmenee kyseisen verkon kompleksisuus ja toisaalta myös sen haasteet. Esimerkiksi jos energiaa ei saadakaan kerättyä tarpeeksi niin verkko ei voi luottaa siihen että tietyt noodit olisivat aina aktiivisena. Tästä johtuen noodit saattavat joutua lähettämään viestejä eri noodille mille ne ovat aikaisemmin kommunikoinneet, joten riittävän tasoinen itseorganisoitavuus on hyvin oleellista tällaisissa tapauksissa.

Viiveet

Erilaiset viiveet ovat välttämättömiä kaikissa laite- ja sensoriverkoissa, mutta langattomiin sensoriverkkoihin liittyen erityisesti kommunikaatioon liittyvät viiveet ovat suuri haaste. Langattomien sensoriverkkojen toiminnan luonteesta johtuen viestien ja niiden sisältämän datan vastaanottaminen sekä käsittely voi viivästyä odottamattomasti lukuisista syistä ja se saattaa erilaisia ongelmia verkon toiminnan kannalta. Erilaiset viiveet voivat liittyä käytännössä mihin tahansa sovelluksen toteutettavan järjestelmän osaan kuten esimerkiksi noodin vikaantumiseen tai häiriöstä johtuvaan kommunikaatiokatkokseen. Monet sovellukset perustuvat puhtaasti erilaisien ilmiöiden ja niihin reagoimisen välisen ajan minimoimiseen, joten odottamattomat viiveet saattavat olla erittäin haitallisia sovellukselle kokonaisuudessaan. Esimerkiksi kriittisimmät valvontasovellukset kuten tulipalosta varoittavat järjestelmät saattaisivat kärsiä erittäin merkittävästi jopa yksittäisistä tai epäsäännöllisistä viiveistä [262]. Teollisuudessa hyödynnetään myös paljon erilaisia ohjauslaitteita kuten venttiileitä ja moottoreita, joten erilaiset viiveet saattavat vaikuttaa myös suoraan erilaisiin tuotannon prosesseihin vaikka siitä ei hengenvaaraa aiheutuisikaan. Mittaus- ja ohjauslaitteiden välillä esiintyvät kommunikaatioviiveet saattavat siis esimerkiksi laskea kyseisen prosessin ja sen valmistaman tuotteen laatua [142].

Reaaliaikaisuus

Reaaliaikaisuus on merkittävä ominaisuus ja vaatimus mille tahansa järjestelmälle ja sen toteuttaminen on usein haastavaa. Langattomien sensoriverkkojen osal-

ta reaaliaikaisuus on haastavaa saavuttaa lukuisista syistä ja monista muuttujista johtuen. Järjestelmätasolla reaaliaikaisuus voidaan toteuttaa vain jos kaikki sen osat täyttävät reaaliaikaisuuden vaatimukset. Langattomissa sensoriverkoissa ja sen noodeissa reaaliaikaisuus tulee huomioida ainakin noodin toiminnassa sekä kommunikaatiossa. Reaaliaikaisuuden saavuttamisen asettamiin haasteisiin voidaan törmätä esimerkiksi kriittisiä mittauksia ja valvontatehtäviä suorittavissa noodeissa. Esimerkiksi kattilan painetta valvovan ja mittaavan noodin saattaisi tulla kyetä suorittamaan toiminnastaan reaaliaikaisesti jolla varmistuttaisiin mittauksen ja siihen reagoimisen välisen ajan säännöllisyydestä [240]. Reaaliaikaisuus ei välttämättä tarkoita että järjestelmän toiminta olisi välitöntä vaan reaaliaikaisuuteen liittyy vahvasti etenkin toiminnan deterministisyys. Tällä tarkoitetaan sitä että järjestelmän toiminta ja reagointi voidaan taata tietyssä ajassa vaikka se ei siis tapahtuisikaan välittömästi. Teollisuuden langattomissa sensoriverkoissa suurimmat reaaliaikaisuuden haasteet löytyvät kommunikaatiosta. Teolliset ympäristöt eivät usein ole optimaalisia langatonta kommunikaatiota ajatellen joten verkon ja siinä käytettävien protokollien tulee omata riittävät ominaisuudet esimerkiksi dynaamisuuden ja liikenteen tarvittavaan priorisointiin liittyen [112].

Ruuhkat

Tietoliikenteen ruuhkautuminen on ongelmallista sillä se saattaa estää lähetetyn tiedon toimittamisen määränpäähänsä jopa kokonaisuudessaan. Ruuhkia voi esiintyä monista erilaisista syistä, mutta useimmiten ruuhkat johtuvat kun verkossa kommunikoi samaan aikaan enemmän laitteita kun verkko pystyy hallitsemaan riittävässä ajassa. Langattomien sensoriverkkojen osalta ruuhkat ovat erityisen ongelmallisia, sillä sensorinoodit omaavat usein ennalta määrätyn aikataulun jolloin noodit kommunikoivat keskenään tai lähettävät tietoa muille laitteille. Tämä tarkoittaa sitä että jos noodit eivät omassa aikaikkunassaan saa viestiään lähetettyä vastaanottajalle, joutuu se odottamaan seuraavaa mahdollisuutta ja yrittämään silloin uudelleen. Ruuhkia voidaan hallita ja vähentää esimerkiksi laadukkailla MAC-protokollilla (medium access control) tai tehokkaalla verkon topologialla, mutta ruuhkia saattaa esiintyä myös täysin odottamattomista syistä johtuen. Esimerkiksi viestejä reitittävän noodin tai tukiaseman vikaantuminen saattaa siirtää kaiken sille tarkoitetun liikenteen toiselle reitityksen toteuttavalle laitteelle joka ylikuormittuu ja siten muodostaa ruuhkan liikenteeseen. Lisäksi ympäristöstä johtuvat hetkelliset häiriöt saattavat aiheuttaa hetkellisiä ruuhkia liikenteeseen kun mikään tietyn taajuusalueen

viesti ei pääse virheettömänä vastaanottajalleen. Esimerkiksi Raza et al. [179] esittävät artikkelissaan erilaisten topologioiden ja protokollien mahdollisia vaikutuksia erilaisiin ruuhkatilanteisiin ja niiden ratkomiseen. Ruuhkia ei kuitenkaan voi useimmissa tapauksissa täysin välttää varsinkaan kun verkkoa aletaan skaalata isommaksi. Pienemmissä verkoissa kommunikaatio voidaan aikatauluttaa siten että noodit eivät kilpaile keskenään lähetykseen käytetyistä taajuuskaistoista missään vaiheessa, mutta tämä rajoittaa verkon kykyä skaalautua suuremmaksi sillä käytettävät kanavat ovat hyvinkin rajallisia [172].

Aikasynkronointi

Aikasynkronointi on oleellinen osa useista noodeista koostuvia sensoriverkkoja. Noodien synkronointi on välttämätöntä jos niiden halutaan kommunikoida keskenään ja mittaustulokset pitää pystyä leimaamaan tarkalla ja oikealla ajalla. Noodit nukkuvat virtaa säästävässä tilassa suurimman osan ajasta ja ne heräävät vain tiettyin aikaväleihin tai ennakkoon ohjelmoidun aikataulun mukaisesti, joten on erityisen oleellista että kaksi tai useampia noodeja on samaan aikaan aktiivisessa tilassa jos niiden välillä halutaan siirtää tietoa. Aikasynkronointi perustuu usein noodien sisäiseen kelloon, jossa pidetään yllä sen hetkistä aikaa, mutta nämäkin kellot vaativat säännöllistä synkronointia. Synkronointi voi tapahtua esimerkiksi noodin kellojen kesken siten että kaikilla noodeilla on riittävän tarkka aika, mutta synkronointi voi tapahtua myös globaalimmalla tasolla hyödyntäen vaikkapa GPS-teknologiaa (Global Positioning System). Ajan synkronointiin liittyy erilaisia haasteita, mutta yksi luonnollinen haaste on tietää kuinka usein ja tarkasti noodien kellot pitäisi synkronoida keskenään. Wang et al. [232] esittelevät langattoman sensoriverkon noodien kellojen synkronointiin liittyvän teoreettisen ratkaisun josta ilmenee hyvin kyseisen haasteen monipuolisuus. Esimerkkinä Farag et al. [56] myös esittävät artikkelissaan aikasynkronoinnin merkitystä osana sensoriverkkoja ja sovelluksia kokonaisuudessaan. Puutteellinen tai väärin toteutettu synkronointi voi siis käytännössä estää sensoriverkon toiminnan tai sen tuottaman datan hyödyntämisen.

Liikkuvuus

Liikkuvuus on monissa teollisuuden käyttökohteissa oleellista, joten langattomien sensoriverkkojen tulisi myös sopeutua siihen. Liikkuvia käyttökohteita teollisuudessa on esimerkiksi erilaiset robotit, joiden avulla siirretään tuotteita tai jotain oleel-

lisiä raaka-aineita paikasta toiseen. Liikkuvuuden haasteet sensoriverkkojen osalta voivat esiintyä esimerkiksi kommunikaatiokatkoksina kun noodin pitäisi saumattomasti siirtyä kommunikoimaan toisen tukiaseman kanssa. Liikkuvien noodien tulisi omat kyky kommunikoida muiden noodien kanssa ilman erityistä olettamusta missä tai milloin kyseinen noodin haluaa kommunikoida [14]. Noodien liikkuvuuden mahdollistaminen vaatii sen hallitsemista myös protokollatasolla jotta esimerkiksi noodien siirtyminen toisen tukiaseman tai muiden noodien piiriin saataisiin suoritettua luotettavasti jo ennen yhteyden katkeamista. Liikkuvuuden mahdollistavat mekanismit ja algoritmit voivat perustua esimerkiksi noodin ja tukiasemien välisen RSSI-arvojen (Received signal strength indicator) seuraamiseen linkin laadun arvioimiseksi [272].

Paikannus

Paikannus on monissa langattomien sensoriverkkojen käyttökohteissa oleellinen osa sen toimintaa. Sensoriverkkoja saatetaan jopa käyttää puhtaasti joidenkin koneiden tai laitteiden paikantamiseen, joten sensorinoodien riittävän tarkka ja luotettava paikannus saattaa monessa sovelluksessa olla sen ainut tehtävä. Sensorinoodien paikannuksen suurimpia haasteita on sen luotettavuus ja tarkkuus vaihtelevissa ja haastavissa olosuhteissa. Noodin paikannus voi tarkoittaa sen absoluuttisen sijainnin mittaamista käyttämällä esimerkiksi GPS-paikannusta, mutta paikannus voi tarkoittaa myös noodien paikannusta toisten noodien tai tukiasemien avulla. Langattomiin sensoriverkkoihin liittyen paikannuksen haasteita esiintyy esimerkiksi noodien sijainnin selvittämisessä ja sen seuraamisessa. Paikannukseen liittyvät haasteet eivät tosin ole ainutlaatuisia sensoriverkkoja koskien vaan ne pätevät myös käytännössä kaikkiin ympäristöön energiaa säteilevien laitteiden paikannukseen liittyen. Esimerkiksi Goyal et al. [68] esittelevät vedenalaisten sensorinoodien paikannukseen mahdollisesti käytettäviä algoritmeja jotka omaavat toisistaan eroa ominaisuuksia. Sensorinoodien paikannuksen avulla voidaan toteuttaa käytännössä minkä vain liikkuvan kohteen seuranta. Liikkuvien kohteiden kuten koneiden tai tuotteiden seuranta onkin hyvin yleinen käyttökohde teollisuuden sovelluksissa ja tuotanto- sekä varastotiloissa [100].

Middleware

Middlewareen liittyvät haasteet ovat suurimmilta osin yleistettävissä myös koskemaan koko noodin sisältämää ohjelmistoa ja siinä ajettavaa koodia. Tämän tutkimuksen osalta middlewareen kohdistuvat suorat maininnat olivat tuloksissa määrältään maltillisia, mutta se ei kuitenkaan vähennä niiden merkitystä. Langattomien sensoriverkkojen osalta erilaiset käyttökohteet saattavat asettaa niille hyvinkin erilaisia vaatimuksia mikä on myös järjestelmien kehityksen kannalta melko suuri haaste juurikin monipuolisuuden kannalta. Monipuolisuus sinällään ei ole haaste, mutta esimerkiksi sensorinoodien ohjelmiston kehitystä hidastaa rajoittuneista resursseista johtuvat yksilölliset ratkaisut. Kehittäjän tulee esimerkiksi varmistaa noodien ja järjestelmän riittävä autonomisuus, skaalautuvuus ja kyky reagoida ongelmiin kuitenkin resursseja tuhlaamatta [21]. Middlewareen ja hieman laajemmin myös koko ohjelmistokehityksen haasteena on tarjota näitä yksittäisiin ja välillä erikoisiin käyttökohteisiin tarkoitettuja ja räätälöityjä noodeja ja järjestelmiä mahdollisimman edullisesti. Monesti kehitystyössä ei pystytä käyttämään kovinkaan laajasti aikaisemmin tuotettua ohjelmistoa tai laajoja käyttöjärjestelmiä juurikin rajallisten resurssien ja järjestelmien ainutlaatuisuuden vuoksi [76].

Käyttöönotto

Käyttöönotto on erittäin oleellinen osa langattomien sensoriverkkojen hyödyntämisestä. Langattomien noodien käyttöönotto yksinkertaisimmillaan on varsin suoraviivaista, sillä sitä varten ei tarvitse suorittaa mittavia kaapelointeja vaan noodit on usein hyvin vapaaasti sijoitettavissa ympäristöön. Käyttöönotossa voi kuitenkin esiintyä paljon erilaisia haasteita varsinkin kun tarkastellaan laajempien verkkojen kokonaisvaltaista käyttöönottoa. Sensoriverkkojen käyttöönotossa haasteita voi esiintyä esimerkiksi noodien optimaaliseen sijoittamiseen tai laajojen verkkojen mitataan konfigurointiin. Käyttöönoton ja sen suunnittelun suhteen on huomioitava paljon erilaisia seikkoja ja varmistettava että mittauksia suorittavat noodit pystyvät ensinäkään suorittamaan niille asetetut mittaukset ja toisena tulee huolehtia että noodit pystyvät kommunikoimaan riittävällä tasolla muiden noodien ja tukiasemien kanssa. Esimerkiksi käyttöönoton haasteena voi olla se ettei akku- tai paristokäyttöisiä laitteita saisi asentaa räjähdysriskiin tiloihin tai että vaikeasti saavutettavaan paikkaan asennettavan noodin huoltaminen vaatisi kohtuuttomasti vaivaa säännöllisin väliajoin [49]. Lisäksi käyttöönoton haasteena voi olla noodien mitta-

vat ja vaativat konfiguroinnit. Esimerkiksi Van Leemput et al. [219] esittelevät artikkelissaan sensoriverkon käyttöön ottamiseen liittyvää kokonaisuutta jossa noodit omaavat riittävät kyvyt muodostaa sensoriverkko ilman merkittävää manuaalista konfigurointia.

Hallinta ja osaaminen

Langattomien sensoriverkkojen **hallintaan ja siihen liittyvän osaamisen** suhteen voidaan törmätä moniin erilaisiin haasteisiin. Sopivien sovellusten ja uusien käyttökohteiden löytäminen kehittyvälle teknologialle on usein melko helppoa, mutta sovelluksia suunniteltaessa pitäisi huomioida myös järjestelmän ja sitä käyttävän henkilöstön kyky vastata asetettuihin vaatimuksiin. Teollisissa ympäristöissä turvallisuus on erittäin tärkeää ja se tulee huomioida myös erilaisten sensoriverkkojen toiminnassa. Sensoriverkkojen ja yksittäisten noodien hallittavuudella saattaa olla siis verkon mittakaavasta riippuen erittäin tärkeä rooli itse verkon tehokkaan hyödyntämisen kannalta. Esimerkiksi turvallisuuden kannalta voi olla oleellisen tärkeää että kaikki verkossa kommunikoivat noodit ja siten myös niiden lähettämien viestien alkuperä voidaan aukottomasti todentaa käyttämällä esimerkiksi erilaisia salausavaimia. Turvallisuuden kannalta voi olla myös oleellista että noodien salausavaimet tai jokin muu autentikointiin liittyvä tunniste voidaan uudelleen ohjelmoida noodille mahdollisimman helposti ja turvallisesti, joten noodien keskitetyllä hallinnalla on tällaisissa tapauksissa erittäin tärkeä rooli. Keskitetyllä hallinnalla voidaan myös joissain tapauksissa tehdä nopeita muutoksia esimerkiksi itse noodissa ajettavan koodin osalta täysin etänä mikä tietysti helpottaa muutoksien tekemistä isommissa sensoriverkoissa [235]. Käytettävän hallintaratkaisun tukiessa kaikkia turvallisia ja riittäviä ominaisuuksia pitää silti huolehtia vielä itse asiaankuuluvan henkilöstön riittävästä osaamisesta ja siitä että järjestelmää osataan käyttää oikein. Henkilötason osaamiseen liittyviä haasteita ovat esimerkiksi erilaisten uhkien tunnistamisen ja niihin reagoiminen tai arkaluontoisten tietojen huolimaton säilöminen ja jakaminen.

Skaalautuvuus

Skaalautuvuus on erittäin oleellinen ominaisuus monille langattomille sensoriverkoille. Hyvin skaalautuva sensoriverkko säilyttää suorituskykynsä ja luotettavuuden myös noodien lukumäärän ja verkon noodien tiheyden kasvaessa alkuperäisestä määrästä. Skaalautuvuuteen liittyy vahvasti haasteita jotka liittyvät itse tek-

nologiaan ja sen monipuolisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi Orozco-Santos et al. [161] vertailevat erilaisten protokollien ja verkon topologioiden skaalautuvuuskyykyä sekä noodien lisäämisen vaikutusta verkon toimintaan. Artikkelin perusteella on oleellista huomioda että skaalautuvuuden ominaisuudet ja rajat ovat sisäänrakennettuna jokaiseen protokollaan ja sitä tukevaan topologiaan hyvinkin teoreettisella tasolla. Protokollakuvauksissa on usein tarkkaan määritelty esimerkiksi kuinka monta viestiä noodit voivat yrittää lähettää tietyssä aikaikkunassa ja skaalautuvuuden osalta tällaiset rajoitteet ovat hyvinkin oleellisia. Skaalautuvuutta voidaan tosin parantaa esimerkiksi myös lisäämällä enemmän tukiasemia (SINK-noodeja), lisäämällä noodeihin toinen radio (lähetys ja vastaanottaminen onnistuisi samaan aikaan) järjestelemällä noodit topologian suhteen tehokkaammin. Skaalautuvuuden kannalta sensoriverkkojen suurin haaste on siis luotettavuuden ja suorituskyvyn putoamien verkon kokoa kasvatettaessa.

Elinkaari

Langattomien sensoriverkkojen **elinkaareen** liittyy paljon monipuolisia haasteita. Sensoriverkon ja yksittäisten noodien koko elinkaari kattaa käytännössä kaiken käyttöönotosta aina käytöstä poistoon asti. Elinkaaren osalta suurimpia haasteita ovat siis kaikki ne asiat jotka estävät tai haittaavat itse sensoriverkon hyödyntämistä sille lasketun käyttöiän aikana. Elinkaaren haasteisiin lukeutuu osittain myös monia muita Taulukossa 3.3 esitettyjä haasteita joita ratkomalla voidaan usein myös noodien ja verkkojen elinkaaren haasteita vähentää. Elinkaaren suurimpana haasteena voidaan pitää erilaisia virrankulutukseen, energian keräämiseen ja säilömiseen sekä noodien kestävyysliittyviä ongelmia. Noodien elinkaarta voidaan pitkittää esimerkiksi energiatehokkaalla toiminnalla, jotta noodit vaatisivat vähemmän huoltoa ja ne voisivat viettää enemmän aikaa dataa tuottavassa aktiivisessa tilassa [243]. Elinkaarta voidaan kasvattaa myös erilaisilla älykkäillä ohjelmistotason ratkaisulla. Monet noodit eivät välttämättä saa kerättyä laadukkainta dataa ollessaan aktiivinen säännöllisen aikataulun mukaisesti vaan mittausdatan laatua ja noodien elinkaarta voidaan kasvattaa myös pitämällä noodit aktiivisena tiettyjen ilmiöiden perusteella. Esimerkiksi noodit voi suorittaa mittauksia melko harvoin, mutta havaittuaan mittausdatassa tietynlaisen tilanteen se voi itse alkaa vähentämään mittauksien välistä aikaa ja siten tuottaa laadukkaampaa dataa [42]. Tällaisessa tilanteessa noodille jää enemmän energiaa mittausten suorittamiseen silloin kun se on tarpeellista eikä energiaa tuhlaata silloin muutoksia ei todennäköisimmin ole havaittavissa.

Vakaus

Sensoriverkkojen **vakauteen** liittyvät haasteet johtuvat usein monien muiden ongelmien aiheuttamista syistä. Vakauteen liittyy vahvasti se että verkko ja noodit toimivat aina odotetusti, vaikka niissä esiintyisikin ajoittaisia ongelmia kuten häiriöitä tai vikaantumista. Vakaus voidaan langattomien sensoriverkkojen osalta ymmärtää myös osittain synonyyminä reaaliaikaisuuden kanssa. Noodien ja itse verkon toiminnan reaaliaikaisuuden tuoma varmuus on yksi tapa varmistaa myös verkon vakaus, sillä se käytännössä takaa verkon vakaan toiminnan myös vikatilanteissa [111].

Luotettavuus ja palvelun laatu

Luotettavuus ja palvelun laatu on teollisuuden langattomien sensoriverkkojen osalta erittäin merkittävä haaste. Luotettavuus sinällään koostuu monista pienemmistä osista ja niiden laadukkaasta toteuttamisesta, mutta yleisellä tasolla ilman riittävä luottoa sensoriverkkoihin ei niitä tulla monissa teollisuuden kohteissa käyttämään. Luotettavuuden kannalta suurimpia haasteita sensoriverkoissa ovat esimerkiksi priorisoidun datan toimittamisen takaaminen riittävässä aikamääreessä [78]. Luotettavuuden osalta oleellinen haaste on myös tuotetun datan laatu ja siinä esiintyvät puutteet. Esimerkiksi teollisuuden prosesseja ohjattaessa tietyn mittauksen perusteella halutaan usein täysi varmuus että kyseinen mittausrvo on oikeasti mitattu arvo, eikä esimerkiksi jonkin algoritmin aikaisemman datan perusteella tuottama arvio. Tällaisissa tapauksissa jos järjestelmä ei saakaan esimerkiksi noodin vikatilanteesta johtuen oikeita mittausrvoja niin koko prosessin laatu saattaa kärsiä. Erityisesti kriittisissä sovelluksissa järjestelmään ja sen tuottamaan dataan pitää olla täysi varmuus ja luottamus ennen kuin sitä voidaan täysimittaisesti hyödyntää.

Data-analyysi

Datan analysointiin ja jalostamisen käytetyt menetelmät tarjoavat paljon erilaisia mahdollisuuksia sensoriverkkojen tuottaman datan hyödyntämiseen. Dataa analysoimalla voidaan esimerkiksi tunnistaa siitä järjestelmien tai ympäristön tiloja ja vaikkapa ennakoida laitteiden tarvitsemia huoltotoimenpiteitä tekoälyä hyödyntämällä. Laadukas datan analysointi vaatii myös laadukkaan datan sen pohjalta, mutta esimerkiksi sensoriverkkojen luotettavuudessa esiintyvät haasteet saattavat

usein heikentää kerätyn datan laatua. Sensoriverkkoihin liittyvän datan analysoinnin osalta suurimpia haasteita on esimerkiksi puuttuvien tai virheellisten mittaus tulosten käsittely osana kokonaisuutta. Esimerkiksi Zhou et al. [268] arvioivat puuttuvan datan ja mittauspisteiden generoimista hyödyntämällä aikaisempia mittaus tuloksia, mutta oleellista on kuitenkin tiedostaa haaste että väärin tehty arvio voi myös vaikuttaa itse sensoriverkon ja siihen liittyvän järjestelmän toimintaan.

Mittaustekniikka

Mittausteknisiin haasteisiin langattomien sensoriverkkojen osalta liittyy vahvasti erilaiset sensoreihin ja niiden käyttämiseen liittyvät rajoitteet. Kriittisissä turvallisuuden takaavissa järjestelmissä voi olla oleellista suorittaa erilaisia mittauksia jatkuvasti tiheään tahtiin joka saattaa asettaa ylitsepääsemättömiä haasteita energiatehokkuutta tavoitteleville sensorinoodille. Vaikka mittausten suorittaminen jatkuvasti tiheään tahtiin ei sinällään olisi haaste sensorinoodille niin mahdollisesti suuresta virrankulutuksesta johtuen paristokäyttöisen noodin hyödyntämistä ei silloin pidettäisi kovinkaan järkevänä [113]. Mittaustekniikan osalta haasteena voidaan siis myös osittain pitää riittävän energiatehokkaiden sensorien puuttumista erilaisiin mittauksiin liittyen.

Noodin resurssit

Sensorinoodin resurssit ovat usein hyvin maltillisia, sillä ne on suunniteltu ja tarkoitettu suorittamaan niille asetettu tehtävä mahdollisimman energiatehokkaasti ja edullisesti. Sensorinoodissa käytetyissä prosessoreista tai mikrokontrollereista löytyy siis todennäköisesti vain tarvittavat toiminnot ja ominaisuudet joten resurssien niukkuus voi esiintyä melko suurenakin haasteena monissa tapauksissa. Resurssien niukkuus voi esiintyä vaikkapa maltillisena laskentatehona, käyttömuistin ja tallennustilan vähyytenä sekä erilaisten kryptologisten ominaisuuksien puuttumisena. Vaikka käytännössä sensorinoodissa voidaan käyttää huomattavan tehokkaitakin prosessoreita niin se ei kuitenkaan ole järkevää lisääntyneen virrankulutuksen ja kasvaneen hankintahinnan vuoksi. Rajoittuneet resurssit myös asettavat haasteita esimerkiksi laajempien ja monipuolisten käyttöjärjestelmien käyttämisen kannalta. Esimerkiksi rajallinen muisti saattaa pakottaa kehittäjiä riisumaan ohjelmistaan paljon toimintoja ja luomaan erilaisia ratkaisuja jopa prosessorikohtaisesti [179]. Resurssien maltillisuus asettaa myös usein haasteita turvallisuuden näkö-

kulmasta. Energiatehokkaan toiminnan tavoittelemisen vuoksi esimerkiksi noodista voi puuttua tai jäädä käyttämättä viestien salaamiseen tai autentikointiin käytettävät kryptologiset ominaisuudet. Noodin maltilliset resurssit saattavatkin olla myös turvallisuuden kannalta merkittävämpiä haasteita [169].

Energiatehokkuus

Energiatehokkuus on erittäin laaja ja monipuolinen käsite joka liittyy vahvasti myös langattomiin sensoriverkkoihin. Energiatehokkuus on luonnollisesti erittäin tärkeä ominaisuus jokaiselle langattomalle laitteelle, sillä mitä energiatehokkaammin laite toimii niin sen pidempään sitä voidaan myös hyödyntää samalla määrällä energiaa. Energiatehokkuuden parantaminen on käytännössä ikuinen tavoite, sillä oletettavasti sitä voidaan aina tavoin tai toisin parantaa. Energiatehokkuuden haasteet langattomissa sensoriverkoissa keskittyvät paitsi elektroniikan ja prosessorien hyötysuhteeseen, mutta myös koko verkon yhteistoimintaan jossa jokainen viesti saadaan toimitettua luotettavasti käyttämällä mahdollisimman vähän energiaa [124]. Langattomat sensoriverkot tarjoavat joustavuutensa vuoksi mahdollisuuksia esimerkiksi sijoittaa kommunikaatiota parantavia, viestejä eteenpäin lähetettäviä noodeja osaksi verkkoa millä voidaan parantaa kommunikaation luotettavuutta ja siten myös parantaa koko verkon tehokkuutta [238].

Energiavarastot

Energiavarastoihin liittyy erilaisia haasteita hyvin monipuolisesti. Energian varastointi on toiminnan kannalta välttämätöntä erityisesti langattomasti toimivien laitteiden osalta, joten on hyvin oleellista että energiaa saataisiin varastoitua mahdollisimman paljon niin tiiviisti ja edullisesti kuin mahdollista. Langattomien sensorinoodien käyttämä energia varastoidaan usein hyödyntämällä erilaisia akkuja ja paristoja. Akuissa ja paristoissa varastoitua energiaa käytetään noodin pyörittämiseen ja jossain vaiheessa varastoitua energiaa loppuu jonka vuoksi noodin lakkaa toimimasta ja paristo täytyy käydä vaihtamassa uuteen. Langattomien sensoriverkkojen osalta suurimmat haasteet energian varastointiin liittyvät esimerkiksi akkujen ja paristojen energiatihyteen ja niiden kokonaiskapasiteettiin. Monissa käyttökohteissa noodien on oltava mahdollisimman pieniä, joten akun tai pariston tulisi olla mahdollisimman pieni. Toisaalta pienemmässä akussa tai paristossa voidaan varastoida vähemmän energiaa kuin suuremmassa akussa, joten noodin energia loppuu

nopeammin kuin käyttämällä suurempaa akkua. Tämä kompromissi tiivistää kokonaisuudessaan energianvarastointiin liittyvät haasteet melko laajasti. Noodin energiaraston kasvattaminen äärettömyyksiin ei ole mahdollista joten energian riittäminen tulee varmistaa esimerkiksi sijoittamalla noodit siten että se ei kärsi häiriöistä ja sen vuoksi joudu lähettämään samaa viestiä useita kertoja [243]. Energiavarastoja voidaan myös täydentää keräämällä energiaa ympäristöstä joten noodien käyttö voi pitkittyä joissain tapauksissa hyvinkin pitkäksi, kunhan käytettävä akkuteknologia myös tukee pitkää käyttöikää vaikeissakin olosuhteissa [116].

Vaatimukset

Vaatimukset ja erilaiset standardit saattavat velvoittaa käyttäjiä, laitteita ja järjestelmiä toimimaan tiettyjen määritysten mukaisesti ja se saattaa aiheuttaa erilaisia haasteita toiminnalle sekä järjestelmille. Vaatimukset usein saattavat rajoittaa vaikkapa erilaisten laitteiden, komponenttien tai kommunikointiteknologioiden käyttöä joten järjestelmiä suunniteltaessa tulisi huomioida kaikki rajoitteet mahdollisimman tarkasti. Erilaisilla vaatimuksilla ja standardien noudattamisella pyritään yleisellä tasolla tuottamaan esimerkiksi laadukkaampia ja turvallisempia järjestelmiä, mutta langattomien sensoriverkkojen osalta kaikkien vaatimusten noudattaminen voi asettaa merkittäviä haasteita. Vaatimusten taso määritellään usein tarkasteltavan järjestelmän tärkeyden ja kriittisyyden perusteella. Kaikki järjestelmät ja niiden sovellukset eivät ole välttämättä esimerkiksi turvallisuuden kannalta kriittisiä, joten niiden suhteen voidaan usein soveltaa lievempiä vaatimuksia verrattuna niihin järjestelmiin, jotka ovat turvallisuuden kannalta kriittisiä. Turvallisuuden takaavat järjestelmät ja sovellukset ovat käytännössä aina kriittisimpiä ja niissä vaatimukset esimerkiksi kommunikaation latenssin ja luotettavuuden osalta ovat paljon tiukempia kuin monitorointia suorittavia järjestelmissä [229]. Vaatimukset voivat olla myös hyvin yksilöllisiä erilaisista projekteista ja käyttökohteista riippuen eikä niiden perusteena tarvitse aina olla mikään standardi tai velvoite. Tällaiset vaatimukset voivat liittyä esimerkiksi käytettävien sensorien tarkkuuteen, akun käyttöikään tai noodin fyysiseen kokoon [6].

Kyberturvallisuus

Kyberturvallisuus on erittäin oleellinen käsite paitsi teollisuuden mutta myös käytännössä kaikkien alojen parissa. Monipuolisten laitteiden, tietojärjestelmien sekä

käyttäjien suojaaminen erilaisilta uhilta kuitenkin asettaa merkittäviä haasteita erityisesti langattomien sensoriverkkojen osalta. Suurimmat haasteet kyberturvallisuuden osalta liittyvät esimerkiksi langattoman kommunikaation avoimeen luonteeseen sekä sensorinoodien fyysiseen suojaamattomuuteen. Teollisuuden kohteissa sensorinoodien keräämä ja kommunikoiva data tulisi aina suojata ja salata tarvittavalla tasolla, sillä sen ei missään vaiheessa haluta päätyvän millekään järjestelmään kuulumattomalle laitteelle tai toimijalle. Langaton kommunikaatio yhdistettynä esimerkiksi noodien resurssien niukkuuteen voi tarkoittaa sitä että viestit ja kommunikaatio jää käytännössä kokonaan salaamatta ja siten koko järjestelmän yksityisyys kärsii merkittävästi [162]. Esimerkiksi Zou ja Wang [276] esittelevät artikkelissaan sensorinoodien välistä kommunikaatiota salakuuntelevan laitteen uhkaa ja merkitystä heikosti suojatussa sensoriverkossa.

Energian kerääminen

Energian kerääminen ympäristöstä on älykäs tapa pidentää langattomien laitteiden käyttöikä, mutta siihen liittyy myös paljon erilaisia rajoitteita ja haasteita. Energian kerääminen ympäristöstä tarjoaa sensorinoodille lisää vaihtelevin määrin energiaa hyödynnettäväksi omassa toiminnassaan. Energiaa voidaan joissain tapauksissa olla tarjolla enemmän kun noodit itse käyttää joten sen vuoksi noodin käyttöikä saattaa olla hyvinkin pitkä. Energian kerääminen ei aina kuitenkaan yksinkertaista vallitsevasta sijainnista ja vaihtelevista olosuhteista johtuen. Energiaa voidaan yksinkertaisimmin kerätä auringon säteilystä tai tuulesta [243]. Energian keräämisessä on kuitenkin huomioitava että aurinko ei välttämättä paista vuoden jokaisena päivänä tai tuuli ei aina ole riittävä tuottamaan noodille sen tarvitsemaa energiaa. Energian kerääminen ja kerätyn energian arvioiminen on siis oleellista myös itse noodin toiminnan suunnittelemisessa, sillä noodille ei voida budjetoida enemmän energiaa käytettäväksi kuin sitä on saatavilla. Energian keräämisen haasteisiin liittyy vahvasti uusien ja monipuolisten energiankeruu mekanismien ja teknologian kehitys. Esimerkiksi Hou ja Tan [80] esittelevät artikkelissaan tekniikkaa jolla sensorinoodien käyttöön voidaan kerätä energiaa lämmöstä käyttäen termoelektrisiä elementtejä ja niitä tukevaa elektroniikkaa.

Kovat olosuhteet

Kovat olosuhteet koettelevat paitsi laitteita, mutta myös asettavat merkittäviä vaatimuksia niiden toiminnan takaamiseksi. Käyttökohteesta ja ympäristöstä riippuen haasteet voivat olla erilaisia mutta yleisimmin ympäristössä ilmeneviä haasteita asettaa esimerkiksi äärimmäiset sääilmiöt tai laitteiden altistuminen kemikaaleille. Yhtenä haasteena sensorinoodien osalta on lisäksi tarjota riittävä kestävyys ja tarvittava suojaus mahdollisimman edullisesti. Teollisuuden tarpeisiin tehtyjä sensorinoodia saattaa löytyä vaikka öljynporauslautoilta joten noodin toiminnan takaamiseksi sen tulee kestää kaikki olosuhteet ja kemikaalit mille se saattaa altistua [142]. Lisäksi noodeja voidaan sijoittaa myös hyvin lähelle erilaisia teollisuuden toimilaitteita kuten isoja moottoreja, joten olosuhteilta suojautuminen ja kestävyys saattaa myös tarkoittaa esimerkiksi jatkuvan kovan värinän sietämistä koko noodin elinkaaren ajan [140].

Häiriöt

Erilaisiin häiriöihin liittyy monenlaisia haittoja langattomiin sensoriverkkoihin liittyen. Langattomaan kommunikaatioon perustuvat verkot ovat siis erittäin alttiita ulkoisille häiriöille ja monet teollisuuden ympäristöt ja tuotantotilat varmasti sen kannalta yksi huonoimmista paikoista. Sensorinoodit ja niiden kommunikaatio ei varmasti pysty välttymään ulkoisilta häiriöiltä, joten häiriöihin liittyvät haasteet keskittyvät vahvasti niiden sietämiseen ja niistä johtuvien ongelmien korjaamiseen. Häiriöt kommunikaatiossa usein myös heijastuvat myös verkon toimintaan laajemmin, kuten noodien virrankulutuksen kasvuun ja viestien viivästyneeseen vastaanottamiseen. Sensoriverkon häiriönsietokykyä voidaan parantaa esimerkiksi käyttämällä useita lähetysreittejä hyödyntäviä topologioita, mutta kuitenkin kahden noodin välisen kommunikaation toimivuutta ei voida mahdollisista häiriöistä johtuen koskaan taata [194]. Sensoriverkoissa häiriötä voi aiheuttaa myös noodit itse, joten kommunikaation pohjana tulisi aina käyttää tehokasta ja luotettavaa MAC-protokollaa joka minimoi yhteentörmäykset ja siten myös muiden noodien häiritsemisen [105].

Kantama

Kantamaan liittyvät haasteet ovat merkittävä osa sensorinoodien langattoman kommunikaation suorituskykyä. Kantamaan ja sen arvioimiseen liittyy monia haasteita, joista yhtenä suurimpana voidaan todeta erilaisten ympäristöjen aiheuttama enakoimattomuus kantaman suhteen. Erilaisten kommunikointiteknologioiden ominaisuuksien arvioiminen voi olla melko suoraviivaista vapaassa tilassa tapahtuvan kommunikaation suhteen, mutta teorian siirtäminen todellisuuteen antaa kuitenkin aina toisenlaisia tuloksia. Langattoman kommunikaation kantaman arviointi on haastavaa teollisuuden erilaisista olosuhteista, ympäröivistä rakenteista ja ulkoisista häiriöistä johtuen. Noodin lähettämä signaali voi vaimentua hyvinkin paljon edellä mainituista seikoista johtuen joka johtaa siihen että vastaanottava noodi ei saa vastaanotettua riittävää määrää energiaa viestin tulkitsemiseksi. Kantamaan vaikuttaa myös paljon käytettävä kommunikaatioprotokolla ja sen ominaisuudet kuten taajuus ja kaistanleveys [252]. Kantama voi olla protokollasta riippuen maksimissaan muutamista metreistä kymmeneen kilometriin, joten protokollaan valittaessa tulee ensisijaisesti huomioida sensoriverkon suunniteltu käyttökohde. Käyttökohdet kuten sähkömittarien lukeminen tai öljy- ja kaasuputkien monitorointi saattaa hyötyä äärimmäisestä kantamasta, mutta esimerkiksi syvällä kaivoksissa käytettävät sensoriverkot saattavat hyötyä erilaisista ominaisuuksista [78].

4 Pohdinta

Tässä luvussa käydään läpi oleellimmat tutkimuskysymyksiin vastaavat tulokset ja pohditaan niiden merkitystä sekä arvioidaan tulosten muodostamaa kokonaisuutta suhteessa aikaisemmin julkaistuun tietoon. Tässä luvussa esitetään myös tutkimuksessa esiintyneitä rajoitteita sekä muodostetaan ehdotuksia mahdollisia jatkotutkimuksia varten. Aliluvussa 4.1 käsitellään ensin tutkimuksen tulosten merkitystä ja tavoitteiden suhteen tehtävää tulkintaa. Myöhemmin Aliluvussa 4.2 käsitellään tutkimuksessa esiintyviä rajoitteita sekä muodostetaan mahdollisia jatkotutkimuksia käsitteleviä ehdotuksia ja suosituksia.

4.1 Tulosten arviointi

Toteutetun kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli vastata kysymykseen "Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?".

Kirjallisuuskatsauksen muodostamat tulokset osoittavat, että langattomien sensoriverkkojen hyödyntämiseen liittyen teollisissa ympäristöissä kohdistuu lukuisia erilaisia ja monipuolisia haasteita. Tulokset esittävässä Taulukossa 3.3 on eritelty yhteensä 26 erilaista haastetta, joiden merkittävyyttä voidaan arvioida ainakin haasteiden mainintojen lukumäärän perusteella. Tulokset osoittavat että langattomien sensoriverkkojen merkittävämpiä haasteita asettavat: luotettavuus ja palvelunlaatu, kovat olosuhteet, ympäristön häiriöt, energiatehokkuus, erilaiset viiveet sekä reitityksen ja topologian ominaisuudet.

Tulokset vastaavat monilta osin asetettuun hypoteesiin teollisuuden laadullisten ja tuomintavarmuudellisten huomioiden osalta. Tulosten dataa tarkastellessa voidaan myös löytää paljon haasteiden välisiä yhteyksiä ja niiden pohjalta perusteltuja johdonmukaisuuksia. Erityisen merkittävällä tasolla mainintoja keräsi erilaiset kommunikaatiossa ilmenevät haasteet kuten reititys ja topologia, viiveet, ruuhkat sekä häiriöt. Hyvin luonnollisesti kommunikaatiolla on langattomissa sensoriverkoissa merkittävä osuus joten kaikki siinä esiintyvät haasteet myös varmasti laskevat koko järjestelmän luotettavuutta joka myös keräsi erittäin paljon mainintoja

tuloksissa.

Tuloksia verrattaessa asetettuun tutkimuskysymykseen voidaan myös pohtia merkityksellisyyden käsitettä ja arvioida voivatko tietyt haasteet olla merkityksellisiä vaikka ne eivät olisi tuloksissa vahvimmin edustettuna. Tulosten osalta merkittäviksi haasteiksi voidaan myös mainita itse teolliseen ympäristöön ja sen olosuhteisiin liittyvät haasteet sillä niihin on erittäin vaikea vaikuttaa edes merkittävän kehityksen osalta. Esimerkiksi sensorinoodien energiatehokkuutta pystytään parantamaan kehittämällä uusia prosessoreita ja elektroniikan ratkaisuja, mutta se ei kuitenkaan yleensä paranna noodien välistä kommunikaatiota teräsrakenteisissa tehdasrakennuksissa tai maanalaisissa kaivoksissa. Ympäristön ja olosuhteiden haasteet voidaan siis ymmärtää aina erittäin merkittäviksi haasteiksi sillä ne usein asettavat sensoriverkkojen kannalta kiinteimmät rajoitteet sovelluksesta riippumatta.

Tuloksia tarkastellessa voidaan arvioida myös haasteita jotka eivät esiinny tutkimuksessa kirjallisuudessa kovinkaan merkittävällä tasolla. Tuloksissa voidaan huomata muutamia merkittäviä seikkoja tiettyjen haasteiden mainintojen niukkuudessa vaikka muut siihen vahvasti liittyvät haasteet keräsivät huomattavasti enemmän huomiota. Langattomien laitteiden osalta energiatehokkuus on aina merkittävä osa sen toimintaa ja esitetyissä tuloksissa se on myös selkeästi tiedostettu haasteena. Energian kulutukseen liittyy vahvasti myös itse käytettävän energian varastointi, joka on myös kirjallisuudessa koettu haasteena, mutta hieman odottamattomasti energian keräämiseen liittyen haasteita ilmenee kirjallisuudessa hyvin vähän. Tulosten dataa voidaan tämän suhteen tulkita monella tapaa ja siten päätellä mahdollisia syitä haasteisiin sen pohjalta. Tuloksien mukaan siis energian keräämiseen ei siis liity merkittävästi haasteita, mutta silti sensorinoodien toiminta pohjautuu usein mahdollisimman pieneen energian kulutukseen juurikin käytettävissä olevan energian niukkuuden vuoksi. Tämän osalta tulokset siis poikkeavat esimerkiksi tutkimuksesta jonka Gilbert ja Balouchi [66] julkaisivat energian keräämisen menetelmistä langattomien sensoriverkkojen parissa. Tutkimus käsittelee energian keräämistä esimerkiksi lämmöstä, värinästä ja sähkömagneettisesta säteilystä, mutta lopputuloksena kuitenkin todetaan, että energian kerääminen esitetyin keinoin on mahdollista, mutta usein ei kuitenkaan käytännöllistä. Käytännöllisyyden esteenä on tarvittavan energiamäärän keräämiseen vaaditun laitteiston fyysinen koko. Pelkästään muutamien milliwattien tuottaminen vaatii usein menetelmästä riippuen kohtuuttoman ison laitteiston mikä kasvattaa luonnollisesti myös noodin kokoa usein liian suureksi. Gilbertin ja Balouchin tutkimukseen pohjautuen voitaisiin siis päätellä että myös

teollisuuden langattomat sensoriverkot voisivat hyötyä merkittävästi entistä tehokkaampien ja monipuolisten energian keruumenetelmien kehityksestä vaikka kirjallisuuskatsauksen osalta tuloksissa tätä potentiaalia ei haasteena kovinkaan laajasti tiedostettu.

Toinen merkittävä haaste joka keräsi erittäin vähän mainintoja on erilaisiin vaatimuksiin liittyvät rajoitteet. Oletettavasti monet teollisuuden ja kriittisen infrastruktuurin erilaiset käyttökohteet koetaan merkittäväksi esimerkiksi huoltovarmuuden vuoksi, mutta tuloksissa kuitenkin vaatimuksia ei koettu juurikaan haasteena. Syyinä mainintojen vähäiseen määrään voi olla esimerkiksi se ettei erilaisia vaatimuksia koeta rajoittavana tekijänä tai että ne esiintyvät tuloksissa yksityiskohtaisemmin muina haasteina. Esimerkiksi järjestelmien turvallisuuteen liittyvät vaatimukset saattavat tuloksissa näkyä kyberturvallisuuden maininnoissa ja hälytysjärjestelmien vaatimukset saattavat näkyä viiveiden ja reaaliaikaisuuden maininnoissa. Näkökulmasta riippuen voidaan myös esittää hieman poikkeuksellinen selitys vaatimusten vähäisyyden pohjalle. Usein esimerkiksi vaatimukset, säännökset ja jopa lainsäädäntö voidaan kokea pakollisena välttämättömyytenä joka voi myös johtaa tuloksien osalta tietynlaiseen vääristymään. Vaatimusten rajoitteita ei siis tiedosteta sellaisenaan vaan siihen liittyen pyritään usein löytämään joku muu syy, sillä vaatimuksiin ei usein pystytä monissa tapauksissa vaikuttamaan itse. Tästä esimerkkinä voi toimia tapaus jossa vaatimuksiin liittyen räjähdysherkässä tilassa ei saisi käyttää sinne hyväksymättömiä ja vaatimukset täyttäviä laitteita. Tässä tapauksessa haasteena siis alun perin olisi siis asetettu vaatimus, mutta on mahdollista että kyseinen haaste pyritäänkin esittämään esimerkiksi teknisenä haasteena jos asennettavalle laitteelle ei olisi helppo saada riittävää hyväksyntää. Vaatimukset siis näkyvät usein parhaiten käsitellessä turvallisuuteen liittyviä asioita niin yksittäisen laitteen, mutta myös kokonaisten järjestelmien osalta.

Laite- ja protokollatasolla teollisuuden sensoriverkot voivat perustua esimerkiksi ZigBee [36], WirelessHART [85], WIA-PA [86] tai ISA100.11a -standardeihin [87], mutta teollisuuden osalta noudatettavia vaatimuksia ja standardeja voi olla myös laajemmalla tasolla liittyen esimerkiksi tieto- ja automaatiojärjestelmien turvaamiseen. Esimerkiksi IEC 62443 -standardikokoelma [88] käsittelee sekä ohjaa teollisten automaatio- ja ohjausjärjestelmien turvallista toteuttamista ja operatiivista ylläpitoa. Lisäksi pohjoisamerikkalainen NIST SP 800-82 -julkaisu [157] käsittelee hyvinkin laajasti erilaisten operatiivisten järjestelmien turvaamista teollisuudessa ja kriittisessä infrastruktuurissa. Teollisuuden vaatimukset ja toiminnan turvaaminen

ulottuu siis kauas myös yksittäisen sensorinoodin vaatimuksista, joten myös sensoriverkkoja toteutettaessa ja hyödynnettäessä on otettava kokonaisuus huomioon. Kirjallisuuskatsauksen tuloksien pohdinnan kannalta voidaan siis huomata vaatimusten ja standardien aiheuttamien haasteiden vähäisyys mikä on hieman odottamatonta.

Katsauksen tulokset tarjoavat laajan ja monipuolisen otannan haasteista erityisesti teollisuuden parissa. Tulokset tukevat aikaisemmin tuotetun kirjallisuuden ja tutkimusten hyödyntämistä yhtenä sekä melko rajaamattomana vastauksena asetettuun tutkimuskysymykseen. Tulosten perusteella voidaan saada selkeä kuva teollisuuden haasteista joka voi olla merkityksellistä esimerkiksi uusia järjestelmiä tai monipuolisia sovelluksia suunniteltaessa. Monia esitettyjä haasteita voidaan luonnollisesti lieventää erilaisin menetelmin kunhan niistä ollaan riittävän tietoisia, mutta on kuitenkin oleellista myös tiedostaa että laajat ja monipuoliset järjestelmät voivat kompleksisuutensa vuoksi kärsiä myös lukuisista pienimmistä haasteista mitä tuloksissa ei ilmene.

Katsauksen tulokset voidaan huomioida myös kun etsitään mahdollisia kehityksen kohteita langattomiin sensoriverkkoihin liittyen. Jokainen tuloksissa esitetty haaste voidaan ymmärtää myös kehityskohteena, mutta tuloksia tarkisteltaessa voidaan mahdollisesti päätellä myös erilaisia kehityksellisiä pullonkauloja.

Esimerkiksi energian keräämiseen liittyvät vähäiset maininnat eivät välttämättä tarkoita että siihen liittyen kaikki olisi ongelmatonta vaan se voi kertoa myös ettei siihen liittyen ole tehty paljoa tutkimusta tai ettei energian keräämistä hyödynnetä kovinkaan laajasti teollisuudessa. Tehokkaalla energian keräämisellä voitaisiin oletettavasti kuitenkin vaikuttaa positiivisesti moniin muihinkin esitettyihin haasteisiin. Energiaa ollessa enemmän käytössä voitaisiin esimerkiksi noodeja pitää useammin aktiivisena mikä voisi parantaa kommunikaatiota ja minimoida viiveitä. Noodin energiabudjetin noustessa voitaisiin myös hyödyntää enemmän esimerkiksi turvallisuuden kannalta tärkeitä prosessorien kryptologisia ominaisuuksia tai tekoälylaskentaan kykeneviä kiihdyttimiä jotka voisivat lisätä noodien autonomisuutta.

4.2 Tutkimuksen rajoitteet ja jatkotutkimukset

Suoritettu kirjallisuuskatsaus ja sen avulla muodostetut tulokset sisältävät muutamia rajoitteita, jotka lukijan tulee huomioida parhaan mahdollisen ymmärryksen saavuttamiseksi tutkitusta aiheesta. Tulokset sinällään edustavat laajaa ja laadu-

kasta otantaa haasteiden selvittämisestä teollisissa ympäristöissä, mutta tuloksista ei kuitenkaan ilmene esimerkiksi kuluttajakäyttöön tarkoitettujen sensoriverkkojen haasteita vertailukohdaksi. Esitettyjen tulosten perusteella ei siis ole mahdollista todistaa mitkä haasteet ja ongelmat olisivat puhtaasti ainutlaatuisia nimenomaan teollisuuden parissa vaikka tutkimus siihen vahvasti kohdistuikin. Tämä ei kuitenkaan heikennä lainkaan tuloksien merkittävyyttä, mutta tulosten vertailu esimerkiksi vastaavaan kuluttajatasolle tehtyyn katsaukseen voisi auttaa kartoittamaan myös puhtaasti teollisuudessa ilmeneviä haasteita laajemmin.

Toisena rajoitteena tutkimuksen osalta voidaan todeta olevan osittaiset erot artikkelien ja niiden tekijöiden näkökulmissa. Tämän tutkimuksen tavoitteena ei ollut mitenkään rajata artikkeleita niiden laajuuden tai yksityiskohtaisuuden perusteella joten artikkelien erilaisuus sinällään tuki tulosten laatua kokonaisuudessaan, mutta tuloksia tarkastellessa on ymmärrettävä niiden eri tasot. Osa artikkeleista saattaa mainita haasteita hyvin yksityiskohtaisen matalalla tasolla kuten energiatehokkuuden, mutta toisaalta osa artikkeleista voi mainita paljon laajemman haasteen kuten elinkaaren johon voidaan myös ymmärrettävästi osittain energiatehokkuus sijoittaa. Nämä näkemyserot tuovat monipuolisuutta tuloksiin, mutta käytetty tutkimusmenetelmä ei siis tässä suoritettussa laajuudessa pysty erottelemaan yksittäisiä tarkkaan määriteltyä haastetta sillä tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa mahdollisimman laaja arvio erilaisista haasteista.

Tuloksia hyödynnettäessä on myös oleellista tiedostaa että suoritettu kirjallisuuskatsaus oli kohdennettu erityisesti siis teollisuuden ympärille, eikä tulokset edusta välttämättä samoja haasteita mitä teollisuuden ulkopuolella voidaan kohdata. Esimerkiksi aikaisemmin mainitut energian keräämiseen liittyvät haasteet eivät välttämättä esiinny merkittävänä tämän tutkimuksen tuloksissa, mutta jos sama katsaus suoritettaisiin hieman sallivimmin hakutermein myös teollisuuden ulkopuolelle niin tulokset voisivat olla erilaisia.

Tutkimuksen tulosten perusteella voitaisiin kohdistaa lisätutkimuksia vaikka jokaiseen mainittuun haasteeseen erikseen ja sen avulla saavuttaa huomattavan yksityiskohtaisempia tuloksia. Haasteiden tarkemman kartoituksen ja selventämisen sijaan oleellisempaa voisi olla myös tulevaisuudessa selvittää ja arvioida konkreettisia sovelluksia sekä käyttökohteita, jotka ovat esimerkiksi teknologisen kehityksen osalta tulleet mahdollisiksi vaikka ne aikaisemmin olisivatkin olleet liian haasteellisia tai puhtaasti mahdottomia toteuttaa. Tällaisen tutkimuksen avulla voitaisiin tarkemmin ymmärtää minkälaiset haasteet ovat ratketessaan tarjonneet uusia tai kehit-

tyneempiä ratkaisuja langattomien sensoriverkkojen osalta. Ratkaisujen vertailua voisi myös suorittaa esimerkiksi kaupallisten ratkaisujen ja toimintojen sekä puolustusteollisuuden välillä, sillä usein vahvasti valtioiden tukeman puolustusteollisuuden kehitysbudjetit voivat olla suurempia kun puhtaasti tulosta tavoittelevien yritysten budjetit ja siten tuotetut järjestelmät hyvin erilaisia myös käyttökohteesta riippuen. Huomioitavaa kuitenkin on tiedon hankinnan haastavuus erityisesti puolustusteollisuuden ratkaisuiden osalta markkinointimateriaalia syvemältä joten tällaisen tutkimuksen toteuttaminen itsessäänkin voisi olla melko haasteellista.

5 Yhteenveto

Langattomat sensoriverkot tarjoavat merkittäviä hyötyjä niin kuluttajatasolla kuin myös teollisuuden sovelluksissa ja teknologioiden nopea kehitys luo jatkuvasti lisää uusia käyttömahdollisuuksia. Teollisuudessa hyödynnettäviltä sensoriverkoilta kuitenkin vaaditaan huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi kotitalouksissa käytettäviltä älykotisovelluksilta erityisesti luotettavuuden suhteen. Teollisuuden kriittisimmät järjestelmät ja prosessit eivät monesti rakennu langattomien sensoriverkkojen varaan, sillä teollinen ympäristö asettaa lukuisia haasteita sensoriverkoille, mutta se ei tarkoita ettei sensoriverkkoja voitaisi hyödyntää laajemmin myös teollisuuden käyttökohteissa.

Tutkimuksessa suoritettiin systemaattinen kirjallisuuskatsaus langattomien sensoriverkkojen rajoitteiden ja haasteiden selvittämiseksi teollisissa käyttökohteissa sekä ympäristöissä. Kirjallisuuskatsausta ohjasi tutkimuskysymys ”Mitkä ovat suurimmat haasteet ja rajoitteet langattomien sensoriverkkojen yhdistämisessä teollisiin ympäristöihin?” johon pystytään vastaamaan Taulukon 3.3 esittämällä tuloksilla. Tutkimuskysymyksen asettelu tarjosi laajoja ja monipuolisia vastauksia eri teollisuuden aloilta, joten tulosten merkittävyyttä ja vaikutuksia on mahdollista pohtia myös syvällisemminkin.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksista ilmenee lukuisia haasteita ja rajoitteita langattomien sensoriverkkojen hyödyntämiseen teollisuudessa. Yksittäisten vastausten lisäksi katsauksen merkittävänä tuloksena voidaan esittää myös kaksi muuta oleellista huomiota. Ensimmäisenä tuloksia analysoidessa voidaan todeta, että erilaisien käyttökohteiden yksilölliset vaatimukset asettavat myös yksilöllisiä haasteita ja kompromisseja käytettäville sensoriverkoille. Esimerkiksi järjestelmässä jossa sensoriverkon noodilta vaaditaan keskimääräistä suurempaa laskentatehoa, voidaan myös olettaa virrankulutuksen olevan suurempi, mutta onko tällaisessa tapauksessa todellinen haaste siis korkea virrankulutus vai alhainen laskentateho niin se on aina tapauskohtaista ja osittain myös tulkinnanvaraista. Tuloksia käsittelevän Taulukon 3.3 esitetyt kohdat ovat siis haasteita ja rajoitteita kaikissa teollisuuden käyttökohteissa, osa vain useammin mainittuja ja siten myös merkittävämpiä kuin toiset. Täydellistä sensoriverkkoa ei varmasti siis voi ollakaan missä mitään mainittua

haastetta tai rajoitetta ei ilmenisi.

Toisena oleellisena huomiona voidaan pohtia tutkimuskysymyksen asettelua ja pyrkiä tarjoamaan siihen kohdennetun vastauksen. Monet tuloksissa mainituista haasteista pätevät myös langattomiin sensoriverkkoihin teollisuuden ulkopuolella joten on oleellista analysoida mitkä vastauksista liittyvät merkittävimmin nimenomaan teollisuuden tarpeisiin. Käytännössä kaikkiin muihin esitettyihin haasteisiin ja rajoitteisiin voidaan jollain tavoin vaikuttaa paitsi vallitsevaan ympäristöön. Langattomien sensoriverkkojen käyttö teollisuuden kovissa olosuhteissa asettaa merkittäviä haasteita järjestelmien luotettavuuden suhteen, joten ympäristöstä johtuvat haasteet ovat erittäin merkittävä tekijä sensoriverkkojen hyödyntämisen suhteen teollisuudessa.

Kartoitus tarjoaa laajan ja luotettavan otannan erilaisista ongelmista, mutta itse kartoitukseenkin liittyen tulee huomioida muutamia rajoitteita. Kartoituksessa ei rajattu tutkittavaa aineistoa esimerkiksi julkaisuvuoden tai teollisuuden alan mukaan, joten vaikka vastaukset ovat laadukkaita ja hyvin kohdennettuja niin niistä ei ilmene teknologian kehitys ja mahdollisesti teollisuuden muuttuneet tarpeet vaikkapa viime vuosikymmenen aikana. Esimerkiksi nykypäivän kyberturvallisuuden ja erilaisten teollisuuden standardien kasvaneet vaatimukset turvallisuuden osalta eivät välttämättä ilmene tuloksissa nykypäivää vastaavalla tasolla.

Tulevaisuudessa kirjallisuuskatsaus voitaisiin toistaa uudelleen tulosten päivittämiseksi, jolloin muutokset haasteissa ja tutkimuksen kohteena olevissa aihepiireistä olisi helpompi selvittää. Langattomat sensoriverkot kehittyvät varmasti tulevaisuudessakin kovalla vauhdilla, joten oleellista olisi seurata mihin suuntaan kehitys painottuu ja onko kehityksellä vaikutusta teollisuuden haasteisiin. Oletettavaa on että esimerkiksi elektroniikan ja mikrokontrollereiden kehitys voisi parantaa laskeutusta ja alentaa virrankulutusta. Lisäksi uudet käyttöön otettavat taajuusalueet ja kehittyvät protokollat voisivat tulevaisuudessa vaikuttaa merkittävästi teollisuuden asettamiin haasteisiin, jolloin tämänkin kartoituksen tuottamat tulokset voisivat olla hyvinkin erilaisia.

Lähteet

- [1] AHMED, A., VALTINER, D., THOMOS, C., JA DIELACHER, F. Wireless connectivity in industrial sensor and control networks: Challenges and issues in a real implementation for a smart production use-case. *Julkaisusarjassa 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Sept. 2020), vol. 1, 302–309.
- [2] AI, Y., JA CHEFFENA, M. On multi-hop decode-and-forward cooperative relaying for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 17, 44 (Apr. 2017), 695.
- [3] ALAVI, S. A., MEHRAN, K., HAO, Y., RAHIMIAN, A., MIRSAEEDI, H., JA VAHIDINASAB, V. A distributed event-triggered control strategy for dc microgrids based on publish-subscribe model over industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, 4 (July 2019), 4323–4337. arXiv:1906.03623 [cs, eess].
- [4] ALHARBI, N., MACKENZIE, L., JA PEZAROS, D. Enhancing graph routing algorithm of industrial wireless sensor networks using the covariance-matrix adaptation evolution strategy. *Sensors* 22, 1919 (Jan. 2022), 7462.
- [5] ANANTHA, A. P., TOBIANTO DAELY, P., LEE, J. M., JA KIM, D.-S. Edge computing-based anomaly detection for multi-source monitoring in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (Oct. 2020), 1890–1892.
- [6] ANTONIOU, M., BOON, M., GREEN, P., GREEN, P., JA YORK, T. Wireless sensor networks for industrial processes. *Julkaisusarjassa 2009 IEEE Sensors Applications Symposium* (Feb. 2009), 13–18.
- [7] AOUN, M., SCHOOF, A., JA VAN DER STOK, P. Efficient time synchronization for wireless sensor networks in an industrial setting. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems* (New York, NY, USA, Nov. 2008), SenSys 08, Association for Computing Machinery, 419–420.

- [8] ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY (ACM). ACM Digital Library. URL <https://dl.acm.org/>, viitattu 14.8.2024.
- [9] BAGWARI, A., LOGESHWARAN, J., USHA, K., RAJU, K., ALSHARIF, M. H., UTHANSAKUL, P., JA UTHANSAKUL, M. An enhanced energy optimization model for industrial wireless sensor networks using machine learning. *IEEE Access* 11 (2023), 96343–96362.
- [10] BAHRIA, M., OLIVEREAU, A., JA BOUDGUIGA, A. A hybrid threat detection and security adaptation system for industrial wireless sensor networks. Julkaisusarjassa *Self-Organizing Systems* (Berlin, Heidelberg, 2014), W. Elmenreich, F. Dressler, ja V. Loreto, Eds., Springer, 157–162.
- [11] BAL, M. Industrial applications of collaborative wireless sensor networks: A survey. Julkaisusarjassa *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (June 2014), 1463–1468.
- [12] BANY SALAMEH, H. A., DHAINAT, M. F., JA BENKHELIFA, E. An end-to-end early warning system based on wireless sensor network for gas leakage detection in industrial facilities. *IEEE Systems Journal* 15, 4 (Dec. 2021), 5135–5143.
- [13] BELLO, L. L., LOMBARDO, A., MILARDO, S., PATTI, G., JA RENO, M. Software- defined networking for dynamic control of mobile industrial wireless sensor networks. Julkaisusarjassa *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Sept. 2018), vol. 1, 290–296.
- [14] BELLO, L. L., LOMBARDO, A., MILARDO, S., PATTI, G., JA RENO, M. Experimental assessments and analysis of an sdn framework to integrate mobility management in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 8 (Aug. 2020), 5586–5595.
- [15] BIROLINI, A. *Reliability engineering*, vol. 5. Springer, 2007.
- [16] BLUETOOTH SIG, INC. Specifications and Documents. URL <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/>, viitattu 5.11.2024.

- [17] BOUBICHE, D. E., PATHAN, A.-S. K., LLORET, J., ZHOU, H., HONG, S., AMIN, S. O., JA FEKI, M. A. Advanced industrial wireless sensor networks and intelligent iot. *IEEE Communications Magazine* 56, 2 (2018), 14–15.
- [18] BOUBICHE, D. E., PATHAN, A.-S. K., LLORET, J., ZHOU, H., HONG, S., AMIN, S. O., JA FEKI, M. A. Advanced industrial wireless sensor networks and intelligent iot. *IEEE Communications Magazine* 56, 2 (Feb. 2018), 14–15.
- [19] BULDIN, I. D., GORODNICHEV, M. G., MAKHROV, S. S., JA DENISOVA, E. N. Next generation industrial blockchain-based wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)* (Nov. 2018), 1–5.
- [20] CAO, B., ZHAO, J., GU, Y., FAN, S., JA YANG, P. Security-aware industrial wireless sensor network deployment optimization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 8 (Aug. 2020), 5309–5316.
- [21] CAO, B., ZHAO, J., YANG, P., LV, Z., LIU, X., JA MIN, G. 3-d multiobjective deployment of an industrial wireless sensor network for maritime applications utilizing a distributed parallel algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, 12 (Dec. 2018), 5487–5495.
- [22] CENA, G., SCANZIO, S., SENO, L., JA VALENZANO, A. A soft real-time scheduling framework for wireless industrial sensor actuator networks. *Julkaisusarjassa 2016 11th IEEE Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)* (May 2016), 1–11.
- [23] CHANG, C.-L., JA HO, K.-Y. Slot assignment for tdma mac in industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE/ACIS 15th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)* (June 2016), 1–5.
- [24] CHANG, C.-L., JA LEE, H.-T. The construction of logical circular chain for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)* (May 2016), 1–2.
- [25] CHEFFENA, M. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2012, 1 (Sept. 2012), 297.

- [26] CHEN, C., YAN, J., LU, N., WANG, Y., YANG, X., JA GUAN, X. Ubiquitous monitoring for industrial cyber-physical systems over relay- assisted wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 3, 3 (Sept. 2015), 352–362.
- [27] CHEN, J., CAO, X., CHENG, P., XIAO, Y., JA SUN, Y. Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57, 12 (Dec. 2010), 4219–4230.
- [28] CHEN, J., YI, C., WANG, R., ZHU, K., JA CAI, J. A joint optimization of sensor activation and mobile charging scheduling in industrial wireless rechargeable sensor networks. *Julkaisusarjassa ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications* (May 2022), 3568–3573.
- [29] CHEN, Y., YANG, J., LIU, A., LAI, M., XU, Z., JA HU, J. Improving wireless charging efficiency with machine vision and communication for industrial wireless rechargeable sensor networks. *Julkaisusarjassa 2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (July 2020), vol. 1, 882–887.
- [30] CHENARU, O., STAMATESCU, G., STAMATESCU, I., JA POPESCU, D. Towards cloud integration for industrial wireless sensor network systems. *Julkaisusarjassa 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)* (May 2015), 917–922.
- [31] CHENG, X., JA SHA, M. Autonomous traffic-aware scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* 19, 2 (Feb. 2023), 38:1–38:25.
- [32] CHENG, X., JA SHA, M. Meta-learning based runtime adaptation for industrial wireless sensor-actuator networks. *Julkaisusarjassa 2023 IEEE/ACM 31st International Symposium on Quality of Service (IWQoS)* (June 2023), 01–10.
- [33] CHENG, X., JA SHA, M. Mera: Meta-learning based runtime adaptation for industrial wireless sensor-actuator networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* 20, 4 (July 2024), 97:1–97:24.
- [34] CHIWewe, T. M., MBUYA, C. F., JA HANCKE, G. P. Using cognitive radio for interference-resistant industrial wireless sensor networks: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11, 6 (Dec. 2015), 1466–1481.

- [35] COLLOTTA, M., CASCIO, A. L., PAU, G., JA SCATÁ, G. A fuzzy controller to improve csma/ca performance in ieee 802.15.4 industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)* (Sept. 2013), 1–4.
- [36] CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE. Zigbee Specification, Revision 23. URL <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf>, viitattu 3.11.2024.
- [37] CORNELL UNIVERSITY. arXiv. URL <https://arxiv.org/>, viitattu 14.8.2024.
- [38] CORTÉS-LEAL, A., DEL-VALLE-SOTO, C., CARDENAS, C., VALDIVIA, L. J., JA DEL PUERTO-FLORES, J. A. Performance metric analysis for a jamming detection mechanism under collaborative and cooperative schemes in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 22, 11 (Jan. 2022), 178.
- [39] DANIEL, J. J., PANICKER, S. T., THOMAS, L., MATHEW, J. T., JA MATHEW, A. Industrial grade wireless base station for wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology* (Apr. 2011), vol. 2, 245–249.
- [40] DARBANDI, A., JA KIM, M.-K. Autonomous scheduling for reliable transmissions in industrial wireless sensor networks. *Energies* 16, 2020 (Jan. 2023), 7039.
- [41] DENG, X., TANG, Z., YANG, L. T., LIN, M., JA WANG, B. Confident information coverage hole healing in hybrid industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, 5 (May 2018), 2220–2229.
- [42] DERBEW, Y., JA LIBSIE, M. A wireless sensor network framework for large-scale industrial water pollution monitoring. *Julkaisusarjassa 2014 IST-Africa Conference Proceedings* (May 2014), 1–8.
- [43] DEVAN, P. A. M., IBRAHIM, R., OMAR, M. B., BINGI, K., ABDULRAB, H., JA HUSSIN, F. A. Improved whale optimization algorithm for optimal network coverage in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2022 International Conference on Future Trends in Smart Communities (ICFTSC)* (Dec. 2022), 124–129.

- [44] DING, X., TIAN, Y., JA YU, Y. A real-time big data gathering algorithm based on indoor wireless sensor networks for risk analysis of industrial operations. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12, 3 (June 2016), 1232–1242.
- [45] DOBSLAW, F., GIDLUND, M., JA ZHANG, T. Challenges for the use of data aggregation in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (Aug. 2015), 138–144.
- [46] DOBSLAW, F., ZHANG, T., JA GIDLUND, M. Qos-aware cross-layer configuration for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12, 5 (Oct. 2016), 1679–1691.
- [47] DU, R., ZHEN, L., JA LIU, Y. Authentication mechanism based on physical layer security in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Wireless Algorithms, Systems, and Applications* (Cham, 2022), L. Wang, M. Segal, J. Chen, ja T. Qiu, Eds., Springer Nature Switzerland, 567–578.
- [48] DUAN, J., YANG, D., ZHANG, S., ZHAO, J., JA GIDLUND, M. A trust management scheme for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Nov. 2013), 5576–5581.
- [49] DURAN-FAUNDEZ, C., COSTA, D. G., ROCHA-ROCHA, D., VASQUEZ-SALGADO, F., HABIB, G., JA GALDAMES, P. On optimal deployment of industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (Oct. 2017), 1–6.
- [50] EL-FOULY, F. H., JA RAMADAN, R. A. Real-time energy-efficient reliable traffic aware routing for industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 8 (2020), 58130–58145.
- [51] ELGHAZEL, W., MEDJAHAR, K., ZERHOUNI, N., BAHI, J., FARHAT, A., GUYEUX, C., JA HAKEM, M. Random forests for industrial device functioning diagnostics using wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2015 IEEE Aerospace Conference* (Mar. 2015), 1–9.

- [52] ELGHAZEL, W., MEDJAHAR, K., ZERHOUNI, N., BAHJ, J., FARHAT, A., GUYEUX, C., JA HAKEM, M. Random forests for industrial device functioning diagnostics using wireless sensor networks. *arXiv preprint arXiv:1706.08106*, arXiv:1706.08106 (June 2017). arXiv:1706.08106 [cs].
- [53] ELSHARIEF, M., EL-GAWAD, M. A. A., KO, H., JA PACK, S. Eers: Energy-efficient reference node selection algorithm for synchronization in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 20, 1515 (Jan. 2020), 4095.
- [54] ESKOLA, M., JA HEIKKILÄ, T. Detection of short-term radio signal disturbances in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2014)* (July 2014), 612–617.
- [55] FARAG, H., GIDLUND, M., JA ÖSTERBERG, P. Dep-d: A decentralized primal-dual optimization algorithm for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)* (May 2019), 1–5.
- [56] FARAG, H., SISINNI, E., GIDLUND, M., JA ÖSTERBERG, P. Priority-aware wireless fieldbus protocol for mixed-criticality industrial wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal* 19, 7 (Apr. 2019), 2767–2780.
- [57] FENG, Y., WANG, Y., ZHENG, H., MI, S., JA TAN, J. A framework of joint energy provisioning and manufacturing scheduling in smart industrial wireless rechargeable sensor networks. *Sensors* 18, 88 (Aug. 2018), 2591.
- [58] FERNÁNDEZ DE GOROSTIZA, E., BERZOSA, J., MABE, J., JA CORTIÑAS, R. A method for dynamically selecting the best frequency hopping technique in industrial wireless sensor network applications. *Sensors* 18, 22 (Feb. 2018), 657.
- [59] FLORENCIO, H., JA NETO, A. D. Probabilistic inference of the packet delivery ratio in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (July 2018), 1–8.
- [60] FU, J.-S., LIU, Y., CHAO, H.-C., JA ZHANG, Z.-J. Green alarm systems driven by emergencies in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 54, 10 (Oct. 2016), 16–21.

- [61] GALKIN, P. Interaction model design of zigbee-gateway between wireless sensor network and industrial network. *Julkaisusarjassa 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)* (Oct. 2017), 501–504.
- [62] GHOLAMI, M., JA BRENNAN, R. W. Localization of industrial wireless sensor networks: An artificial neural network approach. *Julkaisusarjassa Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing* (Berlin, Heidelberg, 2011), V. Maík, P. Vrba, ja P. Leitão, Eds., Springer, 62–71.
- [63] GHOLAMI, M., JA BRENNAN, R. W. Comparing two clustering-based techniques to track mobile nodes in industrial wireless sensor networks. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 25, 2 (June 2016), 177–209.
- [64] GHOLAMI, M., JA BRENNAN, R. W. A comparison of alternative distributed dynamic cluster formation techniques for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 16, 11 (Jan. 2016), 65.
- [65] GIDLUND, M., HAN, S., SISINNI, E., SAIFULLAH, A., JA JENNEHAG, U. Guest editorial from industrial wireless sensor networks to industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, 5 (May 2018), 2194–2198.
- [66] GILBERT, J. M., JA BALOUCHI, F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. *International Journal of Automation and Computing* 5, 4 (2008), 334–347.
- [67] GOPE, P., DAS, A. K., KUMAR, N., JA CHENG, Y. Lightweight and physically secure anonymous mutual authentication protocol for real-time data access in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15, 9 (Sept. 2019), 4957–4968.
- [68] GOYAL, N., NAIN, M., SINGH, A., ABUALSAUD, K., ALSUBHI, K., ORTEGA-MANSILLA, A., JA ZORBA, N. An anchor-based localization in underwater wireless sensor networks for industrial oil pipeline monitoring. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 45, 4 (2022), 466–474.
- [69] GRIMALDI, S., GIDLUND, M., LENNVALL, T., JA BARA, F. Detecting communication blackout in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)* (May 2016), 1–8.

- [70] GUNATILAKA, D., JA LU, C. React: an agile control plane for industrial wireless sensor-actuator networks. *Julkaisusarjassa 2020 IEEE/ACM Fifth International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)* (Apr. 2020), 53–65.
- [71] GUNGOR, V. C., JA HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56, 10 (Oct. 2009), 4258–4265.
- [72] GUNGOR, V. C., JA HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on industrial electronics* 56, 10 (2009), 4258–4265.
- [73] GUPTA, S., SAHOO, A. K., JA SAHOO, U. K. Wireless sensor network-based distributed approach to identify spatio-temporal volterra model for industrial distributed parameter systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 12 (Dec. 2020), 7671–7681.
- [74] GUPTA, S., VARMA, S., TOMAR, G., JA ABROL, R. Wireless sensor network based industrial monitoring & diagnostic system. *Julkaisusarjassa 2009 First International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks* (July 2009), 125–130.
- [75] GUTIERREZ, J., DUROCHER, D., LU, B., JA HABETLER, T. Applying wireless sensor networks in industrial plant energy evaluation and planning systems. *Julkaisusarjassa Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* (June 2006), 1–7.
- [76] HADIM, S., JA MOHAMED, N. Middleware: Middleware challenges and approaches for wireless sensor networks. *IEEE DISTRIBUTED SYSTEMS ONLINE* 1541 (2006), 4922.
- [77] HAN, G., LIU, L., JIANG, J., SHU, L., JA HANCKE, G. Analysis of energy-efficient connected target coverage algorithms for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13, 1 (Feb. 2017), 135–143.
- [78] HANCKE, G. P., JA HANCKE, G. P. Industrial wireless sensor networks: A selection of challenging applications. *Julkaisusarjassa 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)* (Mar. 2012), 64–68.

- [79] HAYDER, W., JA ABDELLAOUI, M. Novel wireless sensors network routing approach for industrial process control. *Julkaisusarjassa 10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13)* (Mar. 2013), 1–8.
- [80] HOU, L., JA TAN, S. A preliminary study of thermal energy harvesting for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST)* (Nov. 2016), 1–5.
- [81] HU, H., MIN, Y., XIE, X., WANG, F., JA YUAN, J. Distributed cooperative dynamic spectrum management schemes for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking* (Dec. 2008), vol. 2, 381–386.
- [82] IEEE. 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/9144691>, viitattu 5.11.2024.
- [83] IGBOANUSI, I. S., LEE, J. M., JA KIM, D.-S. Field based traffic load balancing for industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Sept. 2019), 1351–1354.
- [84] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Xplore Digital Library. URL <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, viitattu 14.8.2024.
- [85] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62591:2016. URL <https://webstore.iec.ch/en/publication/24433>, viitattu 3.11.2024.
- [86] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62601:2015. URL <https://webstore.iec.ch/en/publication/23902>, viitattu 3.11.2024.
- [87] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. ANSI/ISA-100.11a-2011. URL <https://www.isa.org/products/ansi-isa-100-11a-2011-wireless-systems-for-industr>, viitattu 3.11.2024.
- [88] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. ISA/IEC 62443 Series of Standards. URL <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>, viitattu 3.11.2024.

- [89] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). Frequency ranges for global or regional harmonization of short-range devices. URL https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1896-1-201809-I!!PDF-E.pdf, viitattu 5.11.2024.
- [90] IQBAL, Z., KIM, K., JA LEE, H.-N. A cooperative wireless sensor network for indoor industrial monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13, 2 (Apr. 2017), 482–491.
- [91] J, S. S., K.V, S., JA TANDUR, D. Security of industrial wireless sensor networks: A review. Julkaisusarjassa *2015 International Conference on Trends in Automation, Communications and Computing Technology (I-TACT-15)* (Dec. 2015), 1–6.
- [92] JIANG, L., LIU, Y., YANG, C., KANG, J., JA ZHU, X. A contract-based mobile charging scheme for wireless-powered sensors in industrial internet of things networks. Julkaisusarjassa *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)* (Aug. 2018), 249–254.
- [93] JIE, B., HOU, L., JA YONGGUANG, M. Machine fault diagnosis using industrial wireless sensor networks and support vector machine. Julkaisusarjassa *2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)* (July 2015), vol. 01, 153–158.
- [94] JIN, X., GUAN, N., XIA, C., WANG, J., JA ZENG, P. Packet aggregation real-time scheduling for large-scale wia-pa industrial wireless sensor networks. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* 17, 5 (Sept. 2018), 88:1–88:19.
- [95] JIN, X., KONG, F., KONG, L., WANG, H., XIA, C., ZENG, P., JA DENG, Q. A hierarchical data transmission framework for industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13, 4 (Aug. 2017), 2019–2029.
- [96] JIN, X., XIA, C., XU, H., WANG, J., JA ZENG, P. Mixed criticality scheduling for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 16, 99 (Sept. 2016), 1376.
- [97] JIN, X., XU, H., XIA, C., WANG, J., JA ZENG, P. Convergecast scheduling and cost optimization for industrial wireless sensor networks with multiple radio interfaces. *Wireless Networks* 24, 8 (Nov. 2018), 3205–3219.

- [98] JISHA, S., JA JAMAL, S. Fuzzy rule based data forwarding for energy efficient wireless sensor networks in industrial control system. *Julkaisusarjassa 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)* (July 2013), 1–6.
- [99] JUNG, J., JA SONG, B. The possibility of wireless sensor networks for industrial pipe rack safety monitoring. *Julkaisusarjassa 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences* (Jan. 2014), 5129–5134.
- [100] KAMRUZZAMAN, S. M., JASEEMUDDIN, M., FERNANDO, X., JA MOEINI, P. Wireless positioning sensor network integrated with cloud for industrial automation. *Julkaisusarjassa 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks (LCN)* (Oct. 2017), 543–546.
- [101] KANNAN, M., CHINNAPPAN, S., JA KRISHNAMOORTHY, C. Ant star fuzzy routing for industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2017 Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS)* (May 2017), 444–446.
- [102] KHAKPOUR, K., JA SHENASSA, M. Industrial control using wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications* (Apr. 2008), 1–5.
- [103] KHAN, M. A., SHALU, NAVEED, Q. N., LASISI, A., KAUSHIK, S., JA KUMAR, S. A multi-layered assessment system for trustworthiness enhancement and reliability for industrial wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications* (July 2024).
- [104] KIM, B.-S., KIM, S., KIM, K. H., SUNG, T.-E., SHAH, B., JA KIM, K.-I. Adaptive real-time routing protocol for (m,k)-firm in industrial wireless multimedia sensor networks. *Sensors* 20, 66 (Jan. 2020), 1633.
- [105] KIM, M.-K. Efficient link scheduling based on estimated number of packets in queue on industrial wireless sensor networks. *Energies* 14, 1919 (Jan. 2021), 6370.
- [106] KIM, S., KIM, C., CHO, H., JA JUNG, K. A hierarchical routing graph for supporting mobile devices in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 21, 22 (Jan. 2021), 458.

- [107] KIM, S., KIM, C., CHO, H., YANG, T., KIM, S.-H., JA JUNG, K. Routing graph management for mobility support in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (Feb. 2019), 963–968.
- [108] KITCHENHAM, B., JA CHARTERS, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering.
- [109] KREIBICH, O., NEUZIL, J., JA SMID, R. Quality-based multiple-sensor fusion in an industrial wireless sensor network for mcm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61, 9 (Sept. 2014), 4903–4911.
- [110] KUMAR, M., GUPTA, I., TIWARI, S., JA TRIPATHI, R. A comparative study of reactive routing protocols for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks* (Berlin, Heidelberg, 2013), K. Singh ja A. K. Awasthi, Eds., Springer, 248–260.
- [111] KUMAR, M., TRIPATHI, R., JA TIWARI, S. A reliable real-time routing protocol for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2014 International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)* (Dec. 2014), 1–5.
- [112] KUMAR, M., TRIPATHI, R., JA TIWARI, S. Qos guarantee towards reliability and timeliness in industrial wireless sensor networks. *Multimedia Tools and Applications* 77, 4 (Feb. 2018), 4491–4508.
- [113] KUMAR S., A. A., OVSTHUS, K., JA KRISTENSEN., L. M. An industrial perspective on wireless sensor networks a survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16, 3 (2014), 1391–1412.
- [114] LEE, S.-W., KWON, J.-H., ZHANG, X., JA KIM, E.-J. Traffic-adaptive cfp extension for ieee 802.15.4 dsme mac in industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 9 (2021), 94454–94469.
- [115] LEI, L., KUANG, Y., SHEN, X. S., YANG, K., QIAO, J., JA ZHONG, Z. Optimal reliability in energy harvesting industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15, 8 (Aug. 2016), 5399–5413.
- [116] LEI, L., KUANG, Y., XUEMIN, SHEN, YANG, K., QIAO, J., JA ZHONG, Z. Optimal reliability in energy harvesting industrial wireless sensor networks. *arXiv*

preprint *arXiv:1605.02068*, arXiv:1605.02068 (May 2016). arXiv:1605.02068 [cs, math].

- [117] LI, H., OTA, K., DONG, M., JA CHEN, H.-H. Efficient energy transport in 60 ghz for wireless industrial sensor networks. *IEEE Wireless Communications* 24, 5 (Oct. 2017), 143–149.
- [118] LI, X., WANG, K., LIU, B., XIAO, J., JA HAN, S. An improved range-free location algorithm for industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2020, 1 (Apr. 2020), 81.
- [119] LI, Y., ZHAO, Y., JA ZHANG, Y. A spanning tree construction algorithm for industrial wireless sensor networks based on quantum artificial bee colony. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019, 1 (July 2019), 176.
- [120] LIANG, L., LIU, Y., YAO, Y., YANG, T., HU, Y., JA LING, C. Security challenges and risk evaluation framework for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (Apr. 2017), 0904–0907.
- [121] LIAO, R.-F., WEN, H., WU, J., PAN, F., XU, A., JIANG, Y., XIE, F., JA CAO, M. Deep-learning-based physical layer authentication for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 19, 1111 (Jan. 2019), 2440.
- [122] LIN, C., HAN, G., QI, X., DU, J., XU, T., JA MARTÍNEZ-GARCÍA, M. Energy-optimal data collection for unmanned aerial vehicle-aided industrial wireless sensor network-based agricultural monitoring system: A clustering compressed sampling approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17, 6 (June 2021), 4411–4420.
- [123] LIN, C.-C., CHIN, H.-H., LIN, W.-X., JA LU, K.-W. Dynamic energy-efficient surveillance routing in uncertain group-based industrial wireless sensor networks. *Wireless Networks* 28, 6 (Aug. 2022), 2597–2608.
- [124] LIN, C.-C., DENG, D.-J., CHEN, Z.-Y., JA CHEN, K.-C. Key design of driving industry 4.0: Joint energy-efficient deployment and scheduling in group-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 54, 10 (2016), 46–52.

- [125] LIN, F., CHEN, C., HE, T., MA, K., JA GUAN, X. A separation principle for resource allocation in industrial wireless sensor networks. *Wireless Networks* 23, 3 (Apr. 2017), 805–818.
- [126] LIN, F., CHEN, C., ZHANG, N., GUAN, X., JA SHEN, X. Autonomous channel switching: Towards efficient spectrum sharing for industrial wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal* 3, 2 (Apr. 2016), 231–243.
- [127] LIN, F., DAI, W., LI, W., XU, Z., JA YUAN, L. A framework of priority-aware packet transmission scheduling in cluster-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 8 (Aug. 2020), 5596–5606.
- [128] LIN, F., LI, W., JA YUAN, L. Consensus-based sequential estimation of process parameters via industrial wireless sensor networks. *Sensors* 18, 1010 (Oct. 2018), 3338.
- [129] LIU, J., JA LABEAU, F. Detection of false data injection attacks in industrial wireless sensor networks exploiting network numerical sparsity. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks* 7 (2021), 676–688.
- [130] LIU, L., HAN, G., CHAN, S., JA GUIZANI, M. An snr-assured anti-jamming routing protocol for reliable communication in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 56, 2 (Feb. 2018), 23–29.
- [131] LIU, L., HAN, G., HE, Y., JA JIANG, J. Fault-tolerant event region detection on trajectory pattern extraction for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 3 (Mar. 2020), 2072–2080.
- [132] LIU, L., HAN, G., SHEN, J., ZHANG, W., JA LIU, Y. Diffusion distance-based predictive tracking for continuous objects in industrial wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications* 24, 3 (June 2019), 971–982.
- [133] LIU, L., HAN, G., XU, Z., JIANG, J., SHU, L., JA MARTÍNEZ-GARCÍA, M. Boundary tracking of continuous objects based on binary tree structured svm for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 21, 3 (Mar. 2022), 849–861.

- [134] LIU, L., YU, H., JA ZENG, P. An optimized aggregators selection problem for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation* (June 2008), 4057–4062.
- [135] LIU, M., YANG, K., ZHAO, N., CHEN, Y., SONG, H., JA GONG, F. Intelligent signal classification in industrial distributed wireless sensor networks based industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17, 7 (July 2021), 4946–4956.
- [136] LIU, S., LIANG, W., ZHANG, X., JA ZHENG, M. Grouping tdma access for industrial wireless sensor networks with multiple access points. *Julkaisusarjassa Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation* (June 2014), 146–149.
- [137] LIU, Y., LI, C., XIAO, J., LI, Z., CHEN, W., QU, X., JA ZHOU, J. Qegwo: Energy-efficient clustering approach for industrial wireless sensor networks using quantum-related bioinspired optimization. *IEEE Internet of Things Journal* 9, 23 (Dec. 2022), 23691–23704.
- [138] LIU, Y., LI, C., ZHANG, Y., XIAO, J., JA ZHOU, J. Iqwoa: Improved quantum whale optimization algorithm for clustering in industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2021 IEEE 2nd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)* (Dec. 2021), vol. 2, 337–340.
- [139] LONG, N. B., CHOI, H.-H., JA KIM, D.-S. Energy-aware routing scheme in industrial wireless sensor networks for internet of things systems. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Sept. 2016), 1–8.
- [140] LOW, K. S., WIN, W. N. N., JA ER, M. J. Wireless sensor networks for industrial environments. *Julkaisusarjassa International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)* (2005), vol. 2, IEEE, 271–276.
- [141] LU, B., HABETLER, T., HARLEY, R., JA GUTIERREZ, J. Applying wireless sensor networks in industrial plant energy management systems. part ii. design of sensor devices. *Julkaisusarjassa 2005 IEEE SENSORS* (Oct. 2005), 6 pp.–.

- [142] LU, C., SAIFULLAH, A., LI, B., SHA, M., GONZALEZ, H., GUNATILAKA, D., WU, C., NIE, L., JA CHEN, Y. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE* 104, 5 (2015), 1013–1024.
- [143] LUO, S., WANG, H., WU, J., LI, J., GUO, L., JA PEI, B. Improving energy efficiency in industrial wireless sensor networks using sdn and nfv. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (May 2016), 1–5.
- [144] LV, H., WU, Z., ZHANG, X., JIANG, B., JA GAO, Q. Cascading failure analysis of hierarchical industrial wireless sensor networks under the impact of data overload. *Machines* 10, 55 (May 2022), 380.
- [145] MA, J., YANG, D., ZHANG, H., JA GIDLUND, M. A reliable handoff mechanism for mobile industrial wireless sensor networks. *Sensors* 17, 88 (Aug. 2017), 1797.
- [146] MA, K., LI, Z., LIU, P., YANG, J., GENG, Y., YANG, B., JA GUAN, X. Reliability-constrained throughput optimization of industrial wireless sensor networks with energy harvesting relay. *IEEE Internet of Things Journal* 8, 17 (Sept. 2021), 13343–13354.
- [147] MA, Y., JA LU, C. Efficient holistic control over industrial wireless sensor-actuator networks. *Julkaisusarjassa 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet (ICII)* (Oct. 2018), 89–98.
- [148] MAHANTY, S., KUMAR, R., SHARMA, A., KUMARI, M., KUMARI, P., JA KUMARI, P. Industrial building vibration detection using wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2024 5th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCST)* (Apr. 2024), 516–520.
- [149] MARCHENKO, N., ANDRE, T., BRANDNER, G., MASOOD, W., JA BETTSTETTER, C. An experimental study of selective cooperative relaying in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10, 3 (Aug. 2014), 1806–1816.
- [150] MODEKURTHY, V. P., RAHMAN, M., JA SAIFULLAH, A. Towards mixed criticality industrial wireless sensor-actuator network. *Julkaisusarjassa Procee-*

- dings of the 24th International Conference on Distributed Computing and Networking* (New York, NY, USA, Jan. 2023), ICDCN 23, Association for Computing Machinery, 425–430.
- [151] MONTERO, S., GOZALVEZ, J., JA SEPULCRE, M. Link scheduling scheme with shared links and virtual tokens for industrial wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications* 22, 6 (Dec. 2017), 1083–1099.
- [152] MUKHERJEE, M., SHU, L., FANG, W., JA ZHOU, Z. Sleep scheduling in wireless powered industrial wireless sensor networks: poster abstract. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (New York, NY, USA, Apr. 2017), IPSN 17, Association for Computing Machinery, 301–302.
- [153] MUKHERJEE, M., SHU, L., HU, L., HANCKE, G. P., JA ZHU, C. Sleep scheduling in industrial wireless sensor networks for toxic gas monitoring. *IEEE Wireless Communications* 24, 4 (Aug. 2017), 106–112.
- [154] MUKHERJEE, M., SHU, L., PRASAD, R. V., WANG, D., JA HANCKE, G. P. Sleep scheduling for unbalanced energy harvesting in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 57, 2 (Feb. 2019), 108–115.
- [155] MULTIDISCIPLINARY DIGITAL PUBLISHING INSTITUTE (MDPI). MDPI. URL <https://www.mdpi.com/>, viitattu 14.8.2024.
- [156] MURILLO, M. J., JA SLIPP, J. A. Demo abstract: Application of winter industrial testbed to the analysis of closed-loop control systems in wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (USA, Apr. 2009), IPSN 09, IEEE Computer Society, 409–410.
- [157] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. NIST SP 800-82 Rev. 3. URL <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r3/final>, viitattu 3.11.2024.
- [158] NGUYEN, N. H., JA KIM, M. K. Link quality estimation from burstiness distribution metric in industrial wireless sensor networks. *Energies* 13, 2323 (Jan. 2020), 6430.

- [159] NGUYEN, T. T., JA OH, H. A smart multichannel slotted sense multiple access protocol for industrial wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal* 9, 14 (July 2022), 12460–12471.
- [160] OROZCO-SANTOS, F., SEMPERE-PAYÁ, V., SILVESTRE-BLANES, J., JA ALBERO-ALBERO, T. Multicast scheduling in sdn wise to support mobile nodes in industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 9 (2021), 141651–141666.
- [161] OROZCO-SANTOS, F., SEMPERE-PAYÁ, V., SILVESTRE-BLANES, J., JA VERA-PÉREZ, J. Scalability enhancement on software defined industrial wireless sensor networks over tsch. *IEEE Access* 10 (2022), 107137–107151.
- [162] OUALHA, N., JA OLIVEREAU, A. Sensor and data privacy in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2011 Conference on Network and Information Systems Security* (May 2011), 1–8.
- [163] PALOPOLI, L., PASSERONE, R., JA RIZANO, T. Scalable offline optimization of industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7, 2 (May 2011), 328–339.
- [164] PANG, Z., YU, K., ÅKERBERG, J., JA GIDLUND, M. An rtos-based architecture for industrial wireless sensor network stacks with multi-processor support. *Julkaisusarjassa 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (Feb. 2013), 1216–1221.
- [165] PARK, H.-S., MOON, S., KWAK, J., JA PARK, K.-J. Capl: Criticality-aware adaptive path learning for industrial wireless sensor-actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 19, 8 (Aug. 2023), 9123–9133.
- [166] PARK, P., FISCHIONE, C., BONIVENTO, A., JOHANSSON, K. H., JA SANGIOVANNI-VINCENT, A. Breath: An adaptive protocol for industrial control applications using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 10, 6 (June 2011), 821–838.
- [167] PARK, P., MARCO, P. D., JA JOHANSSON, K. H. Cross-layer optimization for industrial control applications using wireless sensor and actuator mesh networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64, 4 (Apr. 2017), 3250–3259.

- [168] PEI, C., XIAO, Y., LIANG, W., JA HAN, X. Trade-off of security and performance of lightweight block ciphers in industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018, 1 (May 2018), 117.
- [169] PETER, S., STECKLINA, O., JA LANGENDOERFER, P. An engineering approach for secure and safe wireless sensor and actuator networks for industrial automation systems. *Julkaisusarjassa 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation* (Sept. 2009), 1–8.
- [170] PETERSEN, K., FELDT, R., MUJTABA, S., JA MATTSSON, M. Systematic mapping studies in software engineering. *Julkaisusarjassa 12th international conference on evaluation and assessment in software engineering (EASE)* (2008), BCS Learning & Development.
- [171] PETERSEN, K., VAKKALANKA, S., JA KUZNIARZ, L. Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and software technology* 64 (2015), 1–18.
- [172] PETERSEN, S., CARLSEN, S., JA TALEVSKI, A. Industrial it revolution through wireless sensor network technologies. *Julkaisusarjassa 2008 First Conference on IT Revolutions* (Dec. 2008), 1–6.
- [173] POTSCH, A. Ph.d. forum abstract: A scalable testbed infrastructure for embedded industrial wireless sensor and actuator networks. *Julkaisusarjassa 2016 15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)* (Apr. 2016), 1–2.
- [174] PU, C., DING, X., WANG, P., XIE, S., JA CHEN, J. Semantic interconnection scheme for industrial wireless sensor networks and industrial internet with opc ua pub/sub. *Sensors* 22, 2020 (Jan. 2022), 7762.
- [175] PU, C., YANG, H., WANG, P., JA DONG, C. Aoi-bounded scheduling for industrial wireless sensor networks. *Electronics* 12, 66 (Jan. 2023), 1499.
- [176] PÖTSCH, A. A scalable testbed infrastructure for embedded industrial wireless sensor and actuator networks: Ph.d. forum abstract. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 15th International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Vienna, Austria, Apr. 2016), IPSN 16, IEEE Press, 1–2.

- [177] RAJULU, G. G., MURUGESAN, M., MAHABOOG BASHA, S., KALAISELVAN, S., JA KUMAR, M. L. Trajectory-driven efficiency: An energy-efficient opportunistic routing protocol for industrial iot wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)* (Apr. 2024), 1309–1314.
- [178] RAMOTSOELA, D., ABU-MAHFOUZ, A., JA HANCKE, G. A survey of anomaly detection in industrial wireless sensor networks with critical water system infrastructure as a case study. *Sensors* 18, 88 (Aug. 2018), 2491.
- [179] RAZA, M., ASLAM, N., LE-MINH, H., HUSSAIN, S., CAO, Y., JA KHAN, N. M. A critical analysis of research potential, challenges, and future directives in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20, 1 (2018), 39–95.
- [180] ROCHA-ROCHA, D., VÁSQUEZ-SALGADO, F., DURAN-FAUNDEZ, C., DURÁN, R. M., COSTA, D. G., JA GALDAMES, P. Genetic algorithm for the nodes deployment problem in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)* (Oct. 2018), 1–6.
- [181] RUAN, H., DORNEANU, B., ARELLANO-GARCIA, H., XIAO, P., JA ZHANG, L. Deep learning-based fault prediction in wireless sensor network embedded cyber-physical systems for industrial processes. *IEEE Access* 10 (2022), 10867–10879.
- [182] SAHU, D. R., KUMAR RAY, N., JA TRIPATHY, P. K. A review on dependable wireless sensor networks for industrial iot (iiot). *Julkaisusarjassa 2023 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)* (Dec. 2023), 841–846.
- [183] SATRYA, G. B., JA SHIN, S. Y. Evolutionary computing approach to optimize superframe scheduling on industrial wireless sensor networks. *arXiv preprint arXiv:1812.01201*, arXiv:1812.01201 (Dec. 2018). arXiv:1812.01201 [cs].
- [184] SCHMID, J., GÄDEKE, T., STORK, W., HENNRICH, H., JA BLANK, T. A wireless mems-sensor network concept for the condition monitoring of ball screw drives in industrial plants. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (New York, NY, USA, Nov. 2010), *SenSys 10*, Association for Computing Machinery, 425–426.

- [185] SEIJO, ., FERNÁNDEZ, Z., VAL, I., JA LÓPEZ-FERNÁNDEZ, J. A. Sharp: A novel hybrid architecture for industrial wireless sensor and actuator networks. *Julkaisusarjassa 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)* (June 2018), 1–10.
- [186] SEMTECH CORPORATION. LoRa and LoRaWAN. URL <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>, viitattu 5.11.2024.
- [187] SENGUPTA, J., RUJ, S., JA DAS BIT, S. An efficient and secure directed diffusion in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 1st International Workshop on Future Industrial Communication Networks* (New York, NY, USA, Oct. 2018), FICN 18, Association for Computing Machinery, 41–46.
- [188] SEO, D., KIM, S., OH, S., JA KIM, S.-H. K-means clustering-based safety system in large-scale industrial site using industrial wireless sensor networks. *Sensors* 22, 88 (Jan. 2022), 2897.
- [189] SHA, M., GUNATILAKA, D., WU, C., JA LU, C. Empirical study and enhancements of industrial wireless sensor-actuator network protocols. *IEEE Internet of Things Journal* 4, 3 (June 2017), 696–704.
- [190] SHARMA, D. An industrial wireless sensors networks for securing anonymous mutual authentication protocol in real-time data access. *Julkaisusarjassa 2023 3rd International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)* (Dec. 2023), 1–5.
- [191] SHEN, W., ZHANG, T., BARAC, F., JA GIDLUND, M. Prioritymac: A priority-enhanced mac protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10, 1 (Feb. 2014), 824–835.
- [192] SHEN, W., ZHANG, T., JA GIDLUND, M. Joint routing and mac for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks. *Julkaisusarjassa 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (May 2013), 1–6.
- [193] SHEN, W., ZHANG, T., GIDLUND, M., JA DOBSLAW, F. Sas-tdma: a source aware scheduling algorithm for real-time communication in industrial wireless sensor networks. *Wireless Networks* 19, 6 (Aug. 2013), 1155–1170.

- [194] SHEN, X., WANG, Z., JA SUN, Y. Wireless sensor networks for industrial applications. *Julkaisusarjassa Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788)* (June 2004), vol. 4, 3636–3640 Vol.4.
- [195] SHI, H., ZHENG, M., LIANG, W., JA ZHANG, J. Convergecast scheduling for industrial wireless sensor networks with local available channel sets. *IEEE Sensors Journal* 19, 22 (Nov. 2019), 10764–10772.
- [196] SHI, H., ZHENG, M., LIANG, W., JA ZHANG, J. A real-time transmission scheduling algorithm for industrial wireless sensor networks with multiple radio interfaces. *Julkaisusarjassa 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)* (Apr. 2019), 1–7.
- [197] SHI, J., JA SHA, M. Parameter self-adaptation for industrial wireless sensor-actuator networks. *ACM Trans. Internet Technol.* 20, 3 (June 2020), 28:1–28:28.
- [198] SHI, J., SHA, M., JA YANG, Z. Digs: Distributed graph routing and scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. *Julkaisusarjassa 2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)* (July 2018), 354–364.
- [199] SHI, J., SHA, M., JA YANG, Z. Distributed graph routing and scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 27, 4 (Aug. 2019), 1669–1682.
- [200] SHI, Y., WANG, J., FANG, X., GU, S., JA DONG, L. Modelling and control of s-mac based wireless sensor networks control system with network-induced delay in industrial. *Julkaisusarjassa 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)* (July 2017), 1539–1544.
- [201] SHIN, K. G., JA RAMANATHAN, P. Real-time computing: A new discipline of computer science and engineering. *Proceedings of the IEEE* 82, 1 (1994), 6–24.
- [202] SHU, L., MUKHERJEE, M., JA CHEN, Y. Degas: toxic gas boundary area detection in industrial wireless sensor networks: poster abstract. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 15th International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (Vienna, Austria, Apr. 2016), IPSN 16, IEEE Press, 1–2.

- [203] SHU, L., MUKHERJEE, M., WANG, D., FANG, W., JA CHEN, Y. Prolonging global connectivity in group-based industrial wireless sensor networks: poster abstract. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (New York, NY, USA, Apr. 2017), IPSN 17, Association for Computing Machinery, 325–326.
- [204] SHU, L., MUKHERJEE, M., JA WU, X. Toxic gas boundary area detection in large-scale petrochemical plants with industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine* 54, 10 (Oct. 2016), 22–28.
- [205] SHU, L., WANG, L., NIU, J., ZHU, C., JA MUKHERJEE, M. Releasing network isolation problem in group-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Systems Journal* 11, 3 (Sept. 2017), 1340–1350.
- [206] SHUKLA, S. Angle based critical nodes detection (abcnd) for reliable industrial wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications* 130, 2 (May 2023), 757–775.
- [207] SIGFOX. Sigfox Device Radio Specifications. URL <https://build.sigfox.com/sigfox-device-radio-specifications>, viitattu 5.11.2024.
- [208] SPRINGER. SpringerLink. URL <https://link.springer.com/>, viitattu 14.8.2024.
- [209] SU, X., XIE, Y., WANG, H., JA WANG, H. Blockchain-based privacy-preserving authentication key agreement protocol for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2022 IEEE 28th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)* (Jan. 2023), 234–241.
- [210] SUN, J., LIU, D., SHI, Y., YUAN, Y., JA YANG, Y. Industrial wireless sensor network topology non-uniform node optimization deployment. *Julkaisusarjassa 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)* (July 2018), 406–413.
- [211] SUN, L., REN, P., DU, Q., JA WANG, Y. Fountain-coding aided strategy for secure cooperative transmission in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12, 1 (Feb. 2016), 291–300.
- [212] SUN, P., MA, J., JA NI, K. A genetic simulated annealing hybrid algorithm for relay nodes deployment optimization in industrial wireless sensor networks.

- Julkaisusarjassa *2012 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSA) Proceedings* (July 2012), 24–28.
- [213] SUNDARI, G., KISHOR SONTI, V. J. K., JA BERNATIN, T. Mobile agent middleware for wireless sensor network in industrial applications. *Julkaisusarjassa 2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT)* (Apr. 2022), 1–5.
- [214] TABOUN, M. S., JA BRENNAN, R. W. An embedded multi-agent systems based industrial wireless sensor network. *Sensors* 17, 99 (Sept. 2017), 2112.
- [215] TAN, J., LIU, A., ZHAO, M., SHEN, H., JA MA, M. Cross-layer design for reducing delay and maximizing lifetime in industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018, 1 (Mar. 2018), 50.
- [216] TANG, X., XIE, H., CHEN, W., JA NIU, J. Energy-efficient data collection using lossless compression for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Industrial Networks and Intelligent Systems* (Cham, 2018), Y. Chen ja T. Q. Duong, Eds., Springer International Publishing, 14–27.
- [217] TAVALLAIE, O., NAJI, H. R., SABAEI, M., JA ARASTOUIE, N. Rtea: Real-time and energy aware routing for industrial wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications* 95, 4 (Aug. 2017), 4601–4621.
- [218] TEXAS INSTRUMENTS JONAS OLSSON. 6LoWPAN demystified. URL <https://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf?ts=1730769503248>, viitattu 5.11.2024.
- [219] VAN LEEMPUT, D., HOEBEKE, J., JA DE POORTER, E. Integrating battery-less energy harvesting devices in multi-hop industrial wireless sensor networks. arXiv:2310.15745 [cs].
- [220] VERA-PÉREZ, J., SILVESTRE-BLANES, J., JA SEMPERE-PAYÁ, V. Tsch and rpl joining time model for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 21, 1111 (Jan. 2021), 3904.

- [221] VERA-PÉREZ, J., SILVESTRE-BLANES, J., SEMPERE-PAYÁ, V., JA CUESTA-FRAU, D. Multihop latency model for industrial wireless sensor networks based on interfering nodes. *Applied Sciences* 11, 1919 (Jan. 2021), 8790.
- [222] WAN, L., HAN, G., JIANG, J., JA SHU, L. Optimal design of compact receive array in industrial wireless sensor networks. arXiv:1604.02511 [cs, math].
- [223] WANG, D., LI, W., JA WANG, P. Measuring two-factor authentication schemes for real-time data access in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14, 9 (Sept. 2018), 4081–4092.
- [224] WANG, H., ZOU, Y., LIU, X., JA LI, M. A fast convergence scheme for distributed consensus time synchronization using multihop virtual links in industrial wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal* 24, 12 (June 2024), 20009–20017.
- [225] WANG, J., TALL, H., JA CHALHOUB, G. Competition: Smart flooding with multichannel for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 2018 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks* (USA, Feb. 2018), EWSN 18, Junction Publishing, 219–220.
- [226] WANG, J., ZHU, R., LIU, S., JA CAI, Z. Node location privacy protection based on differentially private grids in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 18, 22 (Feb. 2018), 410.
- [227] WANG, L., AN, L., NI, H.-Q., YE, W., PARDALOS, P. M., JA FEI, M.-R. Pareto-based multi-objective node placement of industrial wireless sensor networks using binary differential evolution harmony search. *Advances in Manufacturing* 4, 1 (Mar. 2016), 66–78.
- [228] WANG, L., FU, X., FANG, J., WANG, H., JA FEI, M. Optimal node placement in industrial wireless sensor networks using adaptive mutation probability binary particle swarm optimization algorithm. *Julkaisusarjassa 2011 Seventh International Conference on Natural Computation* (July 2011), vol. 4, 2199–2203.
- [229] WANG, Q., JA JIANG, J. Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, 3 (2016), 2197–2219.

- [230] WANG, Z., SUN, D., JA YU, C. Reference broadcast-based secure time synchronization for industrial wireless sensor networks. *Applied Sciences* 13, 1616 (Jan. 2023), 9223.
- [231] WANG, Z., YONG, T., JA SONG, X. Fast and low-overhead time synchronization for industrial wireless sensor networks with mesh-star architecture. *Sensors* 23, 88 (Jan. 2023), 3792.
- [232] WANG, Z., YONG, T., SONG, X., JA SUN, D. Maximum likelihood estimation of relative clock skew for distributed time synchronization in industrial wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal* 23, 24 (Dec. 2023), 31359–31367.
- [233] WANG, Z., ZENG, P., KONG, L., LI, D., JA JIN, X. Node-identification-based secure time synchronization in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 18, 88 (Aug. 2018), 2718.
- [234] WANG, Z., ZENG, P., ZHOU, M., LI, D., JA WANG, J. Cluster-based maximum consensus time synchronization for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 17, 11 (Jan. 2017), 141.
- [235] WEHNER, M., ZEISBERG, S., OLIVEREAU, A., OULHA, N., GHEORGHE, L., SLUSANSCHI, E., HESS, B., VON REISCHACH, F., LUDWIG, M., JA BATEMAN, D. A trustworthy architecture for wireless industrial sensor networks: Research roadmap of eu twisnet trust and security project. *Julkaisusarjassa 2011 First SysSec Workshop* (July 2011), 63–66.
- [236] WILLIG, A. Placement of relayers in wireless industrial sensor networks: An approximation algorithm. *Julkaisusarjassa 2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)* (Apr. 2014), 1–6.
- [237] WU, J., DONG, M., OTA, K., TARIQ, M., JA GUO, L. Cross-domain fine-grained data usage control service for industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 3 (2015), 2939–2949.
- [238] WU, J., SHAO, X., JA ZHU, H. Relay node deployment based small world effect in hierarchical industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing* (Aug. 2013), 1066–1071.

- [239] WU, S., CHOU, W., NIU, J., JA GUIZANI, M. Delay-aware energy-efficient routing towards a path-fixed mobile sink in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 18, 33 (Mar. 2018), 899.
- [240] XIA, C., JIN, X., KONG, L., JA ZENG, P. Scheduling for emergency tasks in industrial wireless sensor networks. *Sensors* 17, 77 (July 2017), 1674.
- [241] XIONG, X., DONG, C., JA NIU, K. rsem: System-entropy-measure-guided routing algorithm for industrial wireless sensor networks. *Sensors* 22, 2121 (Jan. 2022), 8291.
- [242] XU, C., XIA, C., ZENG, P., JA YU, H. Energy efficient multiband cooperative spectrum sensing for heterogeneous cognitive industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)* (Oct. 2018), 1–7.
- [243] YADAV, A. K., JA KUMAR, A. The smart analysis of prolong lifetime in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2023 International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)* (Apr. 2023), 1–6.
- [244] YANG, D., MAHMOOD, A., HASSAN, S. A., JA GIDLUND, M. Guest editorial: Industrial iot and sensor networks in 5g-and-beyond wireless communication. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18, 6 (June 2022), 4118–4121.
- [245] YANG, D., WANG, H., ZHENG, T., ZHANG, H., GIDLUND, M., JA XU, Y. Demonstration abstract: applying industrial wireless sensor networks to welder machine system. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 13th international symposium on Information processing in sensor networks* (Berlin, Germany, Apr. 2014), IPSN 14, IEEE Press, 319–320.
- [246] YANG, D., XU, Y., WANG, H., ZHENG, T., ZHANG, H., ZHANG, H., JA GIDLUND, M. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 62, 6 (June 2015), 3966–3977.
- [247] YANG, L., LU, Y., YANG, S. X., GUO, T., JA LIANG, Z. A secure clustering protocol with fuzzy trust evaluation and outlier detection for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17, 7 (July 2021), 4837–4847. arXiv:2207.09936 [cs, eess].

- [248] YANG, L., YANG, S. X., LI, Y., LU, Y., JA GUO, T. Generative adversarial learning for trusted and secure clustering in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70, 8 (Aug. 2023), 8377–8387. arXiv:2210.07707 [cs, eess].
- [249] YANG, Q., JI, D., YAO, Y., ZHANG, E., JA CHEN, X. Research on positioning method of industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018, 1 (Oct. 2018), 250.
- [250] YANG, Z., CHEN, C., JA GUAN, X. L0.5-regularization based distributed channel estimation for industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)* (Nov. 2015), 1–6.
- [251] YANG, Z., WU, D., LI, T., FENG, W., JA TU, S. A multi-objective cluster head selection optimization algorithm for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2021 6th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)* (July 2021), 445–452.
- [252] YIN, M., LI, K., JA ZHENG, M. Spectrum utilization of cognitive radio in industrial wireless sensor networks - a review. *Julkaisusarjassa Intelligent Computing and Internet of Things* (Singapore, 2018), K. Li, M. Fei, D. Du, Z. Yang, ja D. Yang, Eds., Springer, 419–428.
- [253] YING, C., ZHAO, Z., YI, C., SHI, Y., JA CAI, J. An aoti-driven joint sampling frequency and access selection optimization for industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 72, 9 (Sept. 2023), 12311–12325.
- [254] YING, C., ZHAO, Z., YI, C., SHI, Y., JA WANG, R. Aoti minimization for multi-type data sampling in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2022 IEEE 20th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)* (Dec. 2022), 36–41.
- [255] YOO, S.-E., JA KIM, T. Industrial wireless sensor networks: Protocols and applications. *Sensors* 20, 2020 (Jan. 2020), 5809.
- [256] YU, K., GIDLUND, M., ÅKERBERG, J., JA BJÖRKMAN, M. Reliable rss-based routing protocol for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa*

IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (Oct. 2012), 3231–3237.

- [257] YU, K., YUE, J., LIN, Z., ÅKERBERG, J., JA BJÖRKMAN, M. Achieving reliable and efficient transmission by using network coding solution in industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (June 2016), 1162–1167.
- [258] YU, S., JA HE, J. Providing trusted data for industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2018*, 1 (Dec. 2018), 289.
- [259] YU, Y.-S., JA CHEN, Y.-S. A measurement-based frame-level error model for evaluation of industrial wireless sensor networks. *Sensors 20*, 1414 (Jan. 2020), 3978.
- [260] ZAND, P., CHATTERJEA, S., KETEMA, J., JA HAVINGA, P. A distributed scheduling algorithm for real-time (d-sar) industrial wireless sensor and actuator networks. *Julkaisusarjassa Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)* (Sept. 2012), 1–4.
- [261] ZHANG, H., LI, Z., SHU, W., JA CHOU, J. Ant colony optimization algorithm based on mobile sink data collection in industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2019*, 1 (June 2019), 152.
- [262] ZHANG, W., LIU, Y., HAN, G., FENG, Y., JA ZHAO, Y. An energy efficient and qos aware routing algorithm based on data classification for industrial wireless sensor networks. *IEEE Access 6* (2018), 46495–46504.
- [263] ZHANG, X., LIU, G., TIAN, Q., JA LI, Z. Mlmac: Multi-channel low-latency mac protocol for industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2011 International Conference on Internet of Things and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing* (Oct. 2011), 338–342.
- [264] ZHANG, Y., YANG, G., JA ZHANG, B. Fw-pso algorithm to enhance the invulnerability of industrial wireless sensor networks topology. *Sensors 20*, 44 (Jan. 2020), 1114.

- [265] ZHANG, Z., SUN, S., LIU, M., JA LI, Z. Network lifetime optimization in multi-hop industrial cognitive radio sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* 19, 1 (Dec. 2022), 20:1–20:22.
- [266] ZHENG, T., QIN, Y., ZHANG, H., JA KUO, S.-Y. A self-configurable power control algorithm for cognitive radio-based industrial wireless sensor networks with interference constraints. *Julkaisusarjassa 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (June 2012), 98–103.
- [267] ZHOU, H., JA YU, K.-M. Imbalanced data classification for defective product prediction based on industrial wireless sensor network. *Julkaisusarjassa 2017 Sixth International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT)* (Aug. 2017), 1–6.
- [268] ZHOU, H., YU, K.-M., LEE, M.-G., JA HAN, C.-C. The application of last observation carried forward method for missing data estimation in the context of industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)* (Aug. 2018), 1–2.
- [269] ZHU, C., LONG, X., HAN, G., JIANG, J., JA ZHANG, S. A virtual grid-based real-time data collection algorithm for industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018, 1 (May 2018), 134.
- [270] ZHU, J., ZOU, Y., JA ZHENG, B. Physical-layer security and reliability challenges for industrial wireless sensor networks. *IEEE Access* 5 (2017), 5313–5320.
- [271] ZHUO, S., SHOKRI-GHADIKOLAEI, H., FISCHIONE, C., JA WANG, Z. Adaptive congestion control in cognitive industrial wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (July 2015), 900–907.
- [272] ZINONOS, Z., JA VASSILIOU, V. Handoff algorithms for industrial mobile wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 2014 6th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)* (Mar. 2014), 1–6.
- [273] ZINONOS, Z., VASSILIOU, V., JA CHRISTOFIDES, T. Radio propagation in industrial wireless sensor network environments: from testbed to simulation

- evaluation. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 7th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks* (New York, NY, USA, Oct. 2012), PM2HW2N 12, Association for Computing Machinery, 125–132.
- [274] ZONG, Y., DAI, X., CANYELLES-PERICAS, P., BUSAWON, K., BINNS, R., JA GAO, Z. Modelling and synchronisation of delayed packet-coupled oscillators in industrial wireless sensor networks. *IFAC-PapersOnLine* 53, 2 (2020), 8283–8289. arXiv:2004.04782 [cs, eess].
- [275] ZOPPI, S., SOLEYMANI, T., KLÜGEL, M., VILGELM, M., HIRCHE, S., JA KELLERER, W. Transmission power control for remote state estimation in industrial wireless sensor networks. *arXiv preprint arXiv:1907.07018*, arXiv:1907.07018 (July 2019). arXiv:1907.07018 [cs, eess].
- [276] ZOU, Y., JA WANG, G. Intercept behavior analysis of industrial wireless sensor networks in the presence of eavesdropping attack. *arXiv preprint arXiv:1502.00116*, arXiv:1502.00116 (Jan. 2015). arXiv:1502.00116 [cs, math].
- [277] ÅKERBERG, J., GIDLUND, M., JA BJÖRKMAN, M. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. Julkaisusarjassa *2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics* (July 2011), 410–415.
- [278] ÅKERBERG, J., GIDLUND, M., LENNVALL, T., NEANDER, J., JA BJÖRKMAN, M. Efficient integration of secure and safety critical industrial wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2011, 1 (Sept. 2011), 100.