

Robottikolonoskopia:
magneetikolonoskopia sujuvoittamaan
suolistosyövän seulontaa

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia
Toukokuu 2025
Anni Halkilahti

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

ANNI HALKILAHTI: Robottikolonoskopia: magneettikolonoskopia sujuvoittamaan suolistosyövän seulontaa

TkK-tutkielma, 25 s.

Lääketieteellinen tekniikka ja terveysteknologia

Toukokuu 2025

Suolistosyöpä on kolmanneksi yleisin ja toiseksi eniten diagnosoitu syöpä. Suolistosyövän seulonta on ainoa tapa havaita ja hoitaa suolistosyöpä ajoissa. Seulonnan ikähaarukan kasvaminen Suomessa, ikääntyvä väestö sekä lisääntyneet suolistosyöpätapaukset nuorempien keskuudessa kuormittavat terveydenhuoltoa. Perinteinen kolonoskopia on yleisin tapa diagnosoida suolistosyöpä, sillä se tarjoaa mahdollisuuden suolen havainnointiin sekä hoidollisiin toimintoihin, kuten biopsiaan. Siihen liittyy erilaisia ongelmia, kuten potilaan tuntema kipu toimenpiteen aikana sekä kolonoskopistien tuki- ja liikuntaelinvammat.

Perinteisen kolonoskopian kohtaamat ongelmat ovat johtaneet robottikolonoskopian tutkimiseen. Sillä tarkoitetaan perinteisen kolonoskopiin korvaamista laitteella, joka tukee kolonoskopistia tietokoneavusteisesti. Robottikolonoskopia käsitteeseen sisältyy monia laitteita, joiden erilaiset liikuttamistavat luovat mahdollisuuden mukavampaan toimenpiteeseen sekä potilaille että kolonoskopisteille. Robottikolonoskopiolla on kuitenkin haasteita, joista yleisiä kaikille robottikolonoskopian laitteille ovat ympäristöystävällisyys ja taloudellinen kannattavuus. Tutkielmassa perehdytään tarkemmin magneettikolonoskopiaan, jolla tarkoitetaan robottikolonoskopian laitetta, joka hyödyntää magneettista liikuttamismekanismia. Tämä luo mahdollisuuden kivuttomampaan kolonoskopiaan potilaalle sekä ergonomisemman työskentelyn ja helpomman kouluttautumisen kolonoskopistille.

Tutkielmassa pohditaan perinteisen kolonoskoopin korvaamista magneettikolonoskoopilla ja sen hyödyntämistä Suomen suolistosyövän seulonnassa. Tutkielmassa todetaan magneettikolonoskopian olevan lupaava tapa tuottaa kivuttomampi toimenpide, mutta sen haasteet hoidollisella puolella estävät sen käyttöönoton suolistosyövän seulonnassa. Tutkielma osoittaa tutkimuksen tärkeyden suolistosyöpätapausten kasvun sekä perinteisen kolonoskopian kohtaamien ongelmien myötä, mutta tulevaisuudessa tutkimuksessa täytyy ottaa huomioon ympäristöystävällisyys ja taloudellinen kannattavuus.

Asiasanat: suolistosyövän seulonta, kolonoskopia, robottikolonoskopia, magneettikolonoskopia

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tausta	4
2.1	Suolistosyöpä	4
2.2	Suolistosyövän seulonta	5
2.3	Kolonoskooppi	7
3	Robottikolonoskopia	10
3.1	Hyödyt	11
3.2	Haasteet	12
4	Magneettikolonoskopia	15
4.1	Rakenne ja hyödyt	15
4.2	Haasteet	17
5	Magneettikolonoskopia suolistosyövän seulonnassa	21
6	Yhteenveto	24
	Lähdeluettelo	26

1 Johdanto

Suolistosyöpä on kolmanneksi yleisin ja toiseksi eniten diagnosoitu syöpä [1]–[3]. Sen tapauksien määrä on kasvussa sekä nuorten että vanhempien keskuudessa [1], [2]. Suolistosyövän alkuvaiheen oireettomuus haittaa sen havaitsemista ajoissa. Tämän vuoksi suolistosyövän seulonta on ainoa tapa havaita ja hoitaa suolistosyöpä ajoissa. [1]–[4] Seulontaan käytetään uloste- ja endoskooppisia menetelmiä, joista kolonoskopia on yleisin tapa sekä diagnosoida että operoida perä- ja paksusuolella [3], [5], [6].

Perinteisen kolonoskopian aiheuttamat ongelmat ovat johtaneet robottikolonoskopian tutkimiseen. Robottikolonoskopian ratkaisuja on monia, mutta tutkielmassa perehdytään tarkemmin magneettikolonoskopiaan. Robottikolonoskopioiden ratkaisut pyrkivät vastaamaan perinteisen kolonoskopian ongelmiin ja luomaan toimenpiteestä mukavampi sekä potilaille että kolonoskopisteille, eli kolonoskopiaan koulutautuneille lääkäreille. [7]–[15]

Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka tarkoituksena on tarkastella robottikolonoskopian alaluokan, eli magneettikolonoskopian, mahdollisuutta korvata perinteinen kolonoskopia Suomen suolistosyövän seulonnassa. Tutkielmassa tarkastellaan suolistosyövän seulontaan ja kolonoskopiaan liittyviä ongelmia sekä yleisesti robottikolonoskopian ja tarkemmin magneettikolonoskopian hyötyjä sekä haasteita. Tutkielma pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

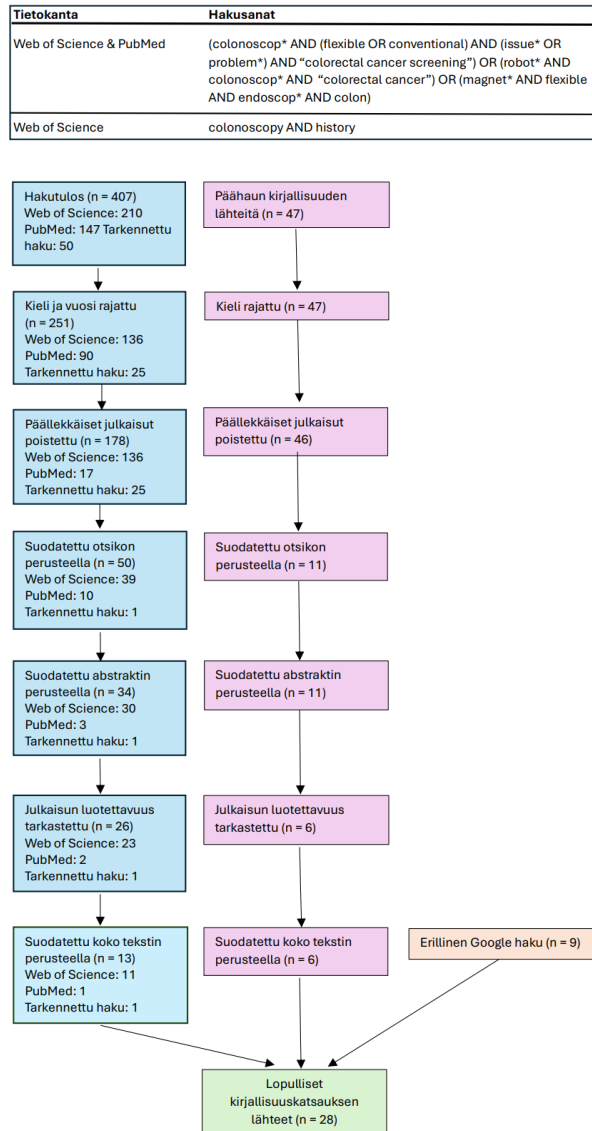
- Tutkimuskysymys 1: Mikä on robottikolonoskopia?

- Tutkimuskysymys 2: Mikä on magneettikolonoskopia?
- Tutkimuskysymys 3: Miten magneettikolonoskopiaa voidaan hyödyntää suolistosyövän seulonnassa?

Tutkielman aineisto on kerätty vuoden 2024 loka- ja marraskuun aikana kansainvälisistä Web of Science (WoS) ja PubMed -tietokannoista. Hakusanoina käytettiin kolonoskopiaa, suolistosyöpää, seulontaa, robotiikkaa ja magneettisuutta kuvaavia termejä. Haku on suoritettu kattavaa hakua käyttäen, jotta tutkielmaan saadaan mahdollisimman paljon aiheeseen liittyviä tutkimuksia. Aineiston sisäänottokriteereihin kuuluivat englanninkielinen tutkimusartikkeli, kirja tai konferenssijulkaisu, julkaisijan "Impact Factor" on yli 2 sekä julkaisuvuosi on aikaväliltä 2014–2024.

Hakutulokseksi muodostui 357 julkaisua, joista 210 on kerätty WoS-tietokannasta ja 147 PubMed-tietokannasta. Tarkennettu haku suoritettiin helmikuussa 2025, koska järjestelmällinen haku ei tuottanut tarvittavaa tietoa perinteisestä kolonoskopiasta. Kirjallisuuskatsauksessa suoritettiin myös manuaalinen etsintä valittujen julkaisujen lähteistä sekä erillinen Google-haku suolistosyövästä, suolistosyövän seulonnasta sekä lääkäreiden työhyvinvoinnista, joihin ei löytynyt sopivia tieteellisiä artikkeleja. Tutkimukset arvioitiin järjestyksessä otsikon, abstraktin ja kokotekstin perusteella. Erillisen Google-haun kohdalla lähteen luotettavuutta arvioitiin tapauskohtaisesti. Kirjallisuuskatsaukseen valikoitui lopulta 28 julkaisua. Tiedonhaku esitellään kuvassa 1.1.

Tutkielman luvun 2 tarkoituksena on luoda pohja tutkimuskysymyksiä käsitteleville luvuille. Luvussa käsitellään suolistosyöpää, sen seulontaa sekä siihen käytettäviä metodeja. Luvussa käsitellään lisäksi suolistosyövän seulontaan ja erityisesti kolonoskopiaan liittyviä ongelmia, joiden vuoksi robottikolonoskopiaa on lähdetty tutkimaan. Luvun 3 tarkoituksena on vastata ensimmäiseen tutkimuskysymykseen ja tarkastella robottikolonoskopian hyötyjä ja haasteita. Luvussa 4 tarkastellaan tarkemmin magneettikolonoskopian rakennetta, hyötyjä ja haasteita. Luvun tarkoi-



Kuva 1.1: Tiedonhaku

tuksena on vastata toiseen tutkimuskysymykseen. Magneetikolonoskopian hyödyntämistä kolonoskopian tilalla pohditaan luvussa 5, jonka tarkoituksena on vastata kolmanteen tutkimuskysymykseen.

2 Tausta

Suolistosyöpä aiheuttaa toiseksi eniten syövästä johtuvia kuolemia ja se on kolmanneksi eniten diagnosoitu syöpä [1]–[3]. Sen kehittyminen kestää yleensä yli 10 vuotta ja se on usein alkuvaiheessa oireeton [1]–[4]. Tämän vuoksi suolistosyövän seulonta on ainoa tapa diagnosoida suolistosyöpä ajoissa [6], [16]. Kolonoskopia on yleisin tapa tutkia perä- ja paksusuoli suolistosyövän varalta [3], [6]. Tutkimus on kuitenkin vaikeasti koulutettavissa ja se on usein potilaille epämukava. Tässä luvussa käsitellään suolistosyöpää, sen seulontaa sekä siihen käytettäviä menetelmiä.

2.1 Suolistosyöpä

Suolistosyöpä tarkoittaa paksu- tai peräsuolen epiteelisoluiasta alkunsa saavaa syöpää [1], [2], [4]. Se on kolmanneksi eniten diagnosoitu syöpä ja aiheuttaa toiseksi eniten syövästä johtuvia kuolemia [1]–[3]. Arviolta vuoteen 2040 mennessä suolistosyövän tapauksien määrä kasvaa 63 % ja kuolemat 73 % [2]. Tämän vuoksi suolistosyövän diagnosointia, hoitoa ja hoitotapoja tulisi kehittää [3]. Suolistosyövän kehittyminen on monimutkainen ja pitkä prosessi [1], [3]. Suolistosyöpään liittyy erilaisia oireita, mutta se on monesti oireeton, mikä tekee sen diagnosoinnista vaikeaa [1]–[4]. Suolistosyövän riskitekijöihin kuuluvat muun muassa ikä, sukupuoli, elintavat ja erilaiset sairaudet.

Suolistosyövän kehittymisellä on kolme vaihetta: initiaatio, promootio ja progressio [1]. Initiaatio tarkoittaa peruuttamattoman geenimutaation syntymistä, mikä al-

tistaa suoliston limakalvon epiteelisolut myöhempään neoplastiseen muutokseen [1], eli ympäristöstä riippumattomaan kasvuun [17]. Promootio tarkoittaa mutatoituneiden solujen kasvamista epänormaaliksi, eli syöväksi. Progressio tarkoittaa hyvänlaatuisen kasvaimen muuttumista pahanlaatuiseksi, jolloin se saa aggressiivisia ominaisuuksia ja kyvyn lähettää etäpesäkkeitä muualle kehoon. Suurin osa suolistosyövistä alkaa pienestä tulehduksesta, joka kehittyy polyypiksi, eli epänormaaliksi kasvaimeksi suoliston seinämässä, ja lopulta karsinoomaksi eli syöväksi. [1] Prosessi on pääsääntöisesti eri mutaatioiden yhteen kertymä ja sen kehittyminen kestää yleensä 10–15 vuotta [1], [3].

Suolistosyövän yleisiin oireisiin kuuluu verinen uloste, vatsanalueen kipu ja/tai turvotus sekä suolentoiminnan muutokset, johon kuuluu muun muassa ripuli ja ummetus. Lisäksi oireisiin voi kuulua selittämätön ja yllättävä painonlasku, ruokahaluttomuus, laskimoveritulppa ja raudanpuuteanemia, joka voi näkyä hengenahdistuksena, kalpeutena, huimauksena, väsymyksenä ja/tai heikkona olona. Suolistosyöpä on kuitenkin alkuvaiheessa lähes oireeton, mikä vaikeuttaa sen diagnosointia ja hoidon aloittamista ajoissa. [1]–[4]

Suolistosyöväällä on monia riskitekijöitä, kuten elämäntavat, mahdolliset perinnölliset ja muut sairaudet, kuten diabetes ja ärtyvän suolen oireyhtymä. [1], [2], [4] Miehillä on suurempi todennäköisyys sairastua ja suurempi kuolleisuus kuin naisilla [1]. Ikä on kuitenkin suurin riskitekijä sairastua, sillä 90 % diagnosoiduista potilaista on yli 50-vuotiaita [1], [2]. On kuitenkin otettava huomioon, että 20–49-vuotiaiden suolistosyöpätapaukset ovat yleistyneet. Jos yleistymisen jatkuu, on mietittävä uudelleen onko ikähaarukka paras tapa seulonnan rajaamiseen. [1]

2.2 Suolistosyövän seulonta

Suolistosyövän seulonnalla tarkoitetaan tietyn ihmisjoukon tutkimista säännöllisin väliajoin suolistosyövän varalta. Nykyään 60–70 % suolistosyövistä havaitaan pit-

källe edenneenä. Suolistosyövän seulonta on tärkeää, sillä se vähentää kuolleisuutta. [6], [16] Mitä pidemmälle suolistosyöpä etenee, sitä vaikeampi sen hoitaminen on [3], [6], [16]. Koska suolistosyövän kehittyminen kestää keskimäärin 10 vuotta ja se on alkuun lähes aina oireeton, suolistosyövän seulonta on ainoa tapa, jolla suolistosyöpä voidaan havaita ajoissa. Suolistosyövän seulontaan käytetään erilaisia menetelmiä, jotka voidaan luokitella ulostepohjaisiin testeihin ja endoskooppisiin metodeihin. [3], [5], [6]

Vuonna 2021 tehdyssä Suomen valtioneuvoksen päätöksessä päätettiin, että 60–68-vuotiaiden suolistosyövän seulonta aloitetaan vuonna 2022. Seulonta on laajenemassa myös 56–74 vuotiaisiin vuonna 2031. Seulonta on maksutonta ja se aloitetaan immunokemiallisella ulosteen veritestillä (engl. faecal immunochemical test, FIT). Positiivisen testituloksen saaneille henkilöillä sovitaan jatkotutkimus, joka yleensä tarkoittaa kolonoskopiaa. [16]

Suolistosyövän seulontaan on olemassa monia menetelmiä, jotka koostuvat pääsääntöisesti ulostepohjaisista testeistä ja endoskooppisista metodeista. Ulostepohjaisista testeistä yleisessä käytössä ovat FIT ja guajakki pohjainen ulosteen piilevä veritesti (engl. guaiac-based occult blood test, gFOBT) [3], [5], [6]. Molemmat testit havaitsevat mahdollisen piilevän veren ulosteesta ja testit voidaan suorittaa potilaan ollessa kotona eivätkä ne tarvitse erillistä suolen valmistelua. Ulosteen DNA testi on uudempi ja tarkempi tekniikka seuloa piilevää verta ulosteessa. Se yhdistää FIT:n ja suolistosyövälle tyypillisten DNA markkereiden analyysin. [6] Nämä ulostepohjaiset menetelmät vaativat kuitenkin positiivisen tuloksen jälkeen jatkotutkimuksia, mikä usein tarkoittaa kolonoskopiaa [5], [6].

Endoskooppisiin metodeihin kuuluvat kolonoskopia, sigmoidoskopia ja kapselien-doskopia [3], [5], [6]. Kolonoskopiaa käsitellään tarkemmin luvussa 2.3. Kolonoskopiolla ja sigmoidoskopiolla tutkitaan perä- ja paksusuolen limakalvoa, mutta sigmoidoskooppi ylettää tutkimaan vain paksusuolen alemman osuuden. Tutkimukset

ovat invasiivisiä, joten ne aiheuttavat monille potilaille epämukavuutta sekä infektion riskin sekä niiden käytön opetteleminen on vaikeaa kolonoskopisteille. Kapseliendoskopia on potilaalle mukavampi, sillä siinä potilas nielee kameran sisältävän kapselin, joka ottaa kuvia kulkeutuessaan ruoansulatuskanavaa pitkin. Kapseliendoskopian saatavuus on vielä rajallinen ja sen liikuttaminen ei ole kontrolloitua, jolloin polyyppi voi jäädä huomaamatta. Edellä mainitut menetot vaativat suoliston valmistelun etukäteen, ja sigmoidoskopiolla sekä kapseliendoskopiolla tehdyt löydökset johtavat jatkotutkimukseen kolonoskopiolla. Kolonoskopia on edelleen ainoa metodi, jolla voidaan tutkia ja tarvittaessa operoida koko paksu- ja peräsuolella. [3], [6]

2.3 Kolonoskooppi

Modernin kolonoskoopin pohja on peräisin 1800-luvulta, kun ihmisen kehittämä valonlähde kiinnitettiin laitteeseen, joka oli ollut käytössä jo Rooman valtakunnan aikana. Vasta 1950-luvulla kehitettiin taipuisa kolonoskooppi, kun keksittiin käytännöllinen keino kuvantuottamiseksi. Kuitenkin vasta vuonna 1969 voitiin tutkia ihmisen koko paksusuoli modernilla kolonoskoopilla. Kolonoskoopin rakenne on pysynyt lähes samana nykypäivään asti. Kolonoskopiaan kouluttautuminen on aikaa vievää ja tutkimus on potilaille epämukava. [18]

Kolonoskooppi koostuu viidestä alayksiköstä, jotka ovat ohjauspää, lieka (engl. tether), kolonoskoopin kärki, napanuorakaapeli ja kolonoskoopin liitin. Ohjauspää on mekaaninen käyttöliittymä, jolla kolonoskopisti voi ohjata kolonoskooppia. Se sisältää työskentelykanavan lisäysaukon, kolonoskoopin ohjauspyörät, kuvanlaadun ja kuva-, ilma-, vesi- ja imunapit. Työskentelykanavalla tarkoitetaan käytävää, joka mahdollistaa kolonoskooppisten työkalujen, kuten silmukkatyökalun (engl. snare), neulan, verkon, pinsetin ja klipsin käyttämisen. [18]

Lieka on pitkä ja jäykkä osa kolonoskooppia, mutta tarpeeksi taipuisa yltääkseen umpisuolen kohdalle. Se sisältää työskentelykanavat ja yhdistää kolonoskoopin

kärjen ja ohjauspään. [12], [18] Sen pituus vaihtelee 1330–1700 mm:n ja paksuus 12,8–14,6 mm:n välillä. Kolonoskoopin kärki on taipuisa ja sitä voidaan kääntää kahdessa eri suunnassa. Se sisältää valonlähteen, kameran sekä työskentelykanavat. Yleensä kolonoskoopit tarjoavat 140–170 asteen näkökentän. Napanuorakaapeli yhdistää ohjauspään ja kolonoskoopin liittimen, joka yhdistää sen valonlähteeseen ja prosessoriin. [18]

Perinteinen kolonoskooppi on yleisin tapa tutkia suolistoa, koska se tarjoaa mahdollisuuden seulonnalle, diagnosoinnille ja hoitotoimenpiteille yhdellä kerralla. Kolonoskopisti työntää kolonoskoopin manuaalisesti sisään sekä säätelee sen liikettä työntämällä ja kääntelemällä. [12] Kolonoskoopin jäykkyys ja työntövoima aiheuttavat suolen venymisen, mikä johtaa potilaan tuntemaan kipua, epämukavuuteen, kudosvaurioon ja jopa perforaatioon, eli suolen puhkeamiseen. Työntövoima voi myös johtaa liean silmukoitumiseen (engl. loop formation), mikä aiheuttaa myös suolen venymisen, minkä kautta potilaan tuntemaan kivun ja epämukavuuden. [7]–[12], [19] Liean jäykkyys on kuitenkin välttämätön sen ohjaamiseen [12].

Kolonoskopian laatu riippuu kolonoskopistin ammattitaidosta. Kouluttautuminen sekä diagnostiseen että hoidolliseen kolonoskopiaan on vaikeaa ja vie huomattavasti aikaa. [7], [8], [19], [20] Toimenpiteen tekeminen aiheuttaa monille kolonoskopisteille tuki- ja liikuntaelinvammoja johtuen huonosta ergonomiasta ja työntövoiman tuottamisesta [19], [21], [22]. Yleisiä sijainteja vammoille ovat selkä, niska, hartiat, kyynärpäät sekä kädet ja sormet [22].

Potilaan näkemys seulonnasta, kuten pelko syövästä tai kolonoskopiasta, sekä halu ei-invasiiviseen tutkimukseen vaikuttavat potilaan päätökseen kieltäytyä tutkimuksesta [22], [23]. Ikääntyvä väestö sekä lisääntyneet suolistosyöpätapaukset nuorilla johtavat siihen, että suolistosyövän seulonnan piiriin kuuluu yhä enemmän ihmisiä [21], [22]. Tämä luo kasvavan taakan palveluntarjoajille.

Suolistosyöpä on kolmanneksi yleisin syöpä ja sen tapauksien määrän on arvioitu

kasvavan huomattavasti. Suolistosyöpä kehittyy yleensä monien vuosien ajan ja se on usein alkuun oireeton. Tämän vuoksi suolistosyövän seulonta on tärkeää, jotta suolistosyöpä voidaan havaita ajoissa. Kolonoskopia on edelleen ainoa tapa diagnosoida ja operoida koko perä- ja paksusuolella. Lieka on jäykkä ja sen liikuttaminen voi johtaa silmukoitumiseen tai suolenseinämän venymiseen, mikä on potilaalle kivulias ja epämiellyttävää. Kolonoskoopin liikuttaminen on epäintuitiivista ja kolonoskopiaan kouluttautuminen on vaikeaa ja hidasta. Seuraavassa luvussa käsitellään robottikolonoskopiaa, jota tutkitaan ratkaisuksi kolonoskopian kohtaamiin ongelmiin.

3 Robottikolonoskopia

Perinteisen kolonoskoopin liikuttaminen, suolenseinämän havainnointi sekä mahdollisten hoidollisten toimenpiteiden tekeminen on kokonaan kolonoskopistin vastuulla. Robottikolonoskopiolla tarkoitetaan laitetta, joka voi tukea kolonoskopistia tietokoneavusteisesti esimerkiksi muuttamalla liikuttamistapaa (engl. actuation method) ja lisäämällä autonomiaa. [21] Autonomia tarkoittaa, että laite voi suorittaa toimenpiteen ilman ihmisen avustusta. Siihen kuuluu eri tasoja, joissa ihmisen tekemä manuaalinen työ vähenee asteittain. [14] Luvussa 4 käsitellään tarkemmin autonomian roolia robottikolonoskopiassa.

Liikuttamistavan muuttaminen vaikuttaa myös kolonoskopistien työskentelyn ergonomiaan sekä työn kuormittavuuteen. Robottikolonoskopiolla on kuitenkin vielä monia haasteita, kuten lokalisaatio, liikkumismekanismi (engl. locomotion) ja ympäristöystävällisyys. [7]–[11], [19], [20], [22] Viime vuosikymmenen aikana robottikolonoskopioteknikka on kehittynyt paljon. Markkinoilla on jo muutamia robottikolonoskooppeja ja monia on vielä tutkimuksen sekä kehityksen alla. Esimerkkejä jo markkinoilla olevista robottikolonoskoopeista ovat Aer-O-Scope [7], [20], Endotics Systemi [19], NeoGuide Endoscopy Systemi [8], Invendoscope SC200 [11], [22], Colonosight [9] ja Endotics Systemi [10].

Luvun tarkoituksena on käsitellä yleisesti, mitä hyötyjä robottikolonoskopiassa on verrattuna perinteiseen kolonoskopiaan. Lisäksi tarkastellaan robottikolonoskopian kohtaamia haasteita.

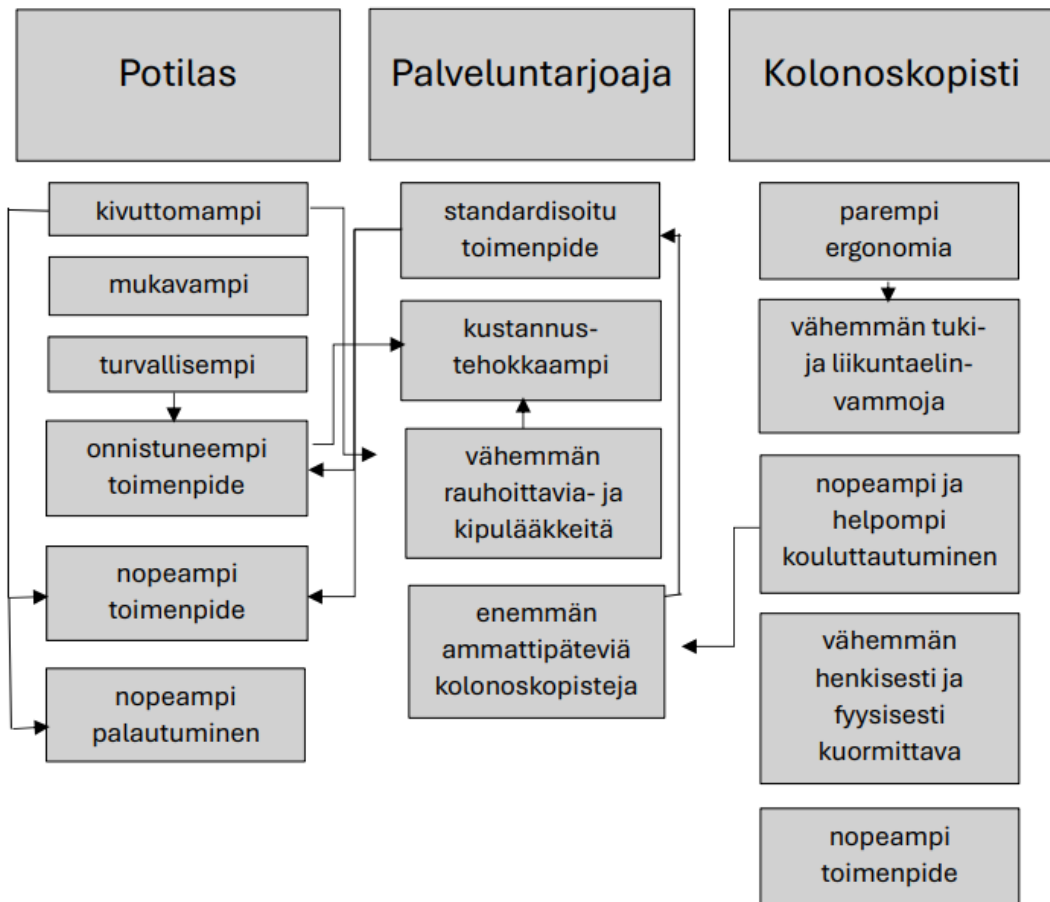
3.1 Hyödyt

Robottikolonoskopiolla on mahdollisuus tarjota potilaille, kolonoskopisteille sekä palveluntarjoajille monia hyötyjä. Nämä vastaavat perinteisessä kolonoskopiassa olevia ongelmia. Näitä ovat muun muassa kivuttomampi ja mukavampi toimenpide potilaille, parempi ergonomia kolonoskopisteille sekä mahdollisesti kustannustehokkaampi suolistosyövän seulonta palveluntarjoajille. [7]–[11] Robottikolonoskopian mahdolliset hyödyt esitellään tiivistetysti kuvassa 3.1.

Turvallisempi kolonoskopia mahdollistaa enemmän onnistuneita toimenpiteitä, mikä tarkoittaa tyytyväisempiä potilaita. Epämukavuutta voidaan vähentää estämällä silmukointia sekä muuttamalla kolonoskoopin liikuttamistapaa [7]–[11], [19]. Kolonoskoopin miniaturisaatio, eli pienemmäksi rakentaminen, vähentää myös toimenpiteen epämukavuutta vähentämällä suolistonseinämän kokonaisvenymistä [21]. Mitä vähemmän potilaat kokevat kipua ja epämukavuutta, sitä vähemmän tarvitaan rauhoittavia lääkkeitä ja potilaat palautuvat toimenpiteestä nopeammin. [21]

Robottikolonoskopia luo mahdollisuuden nopeampaan ja helpompaan koulutukseen, joka puolestaan lisäisi tarvittavien ammattipätevien kolonoskopistien määrää ja mahdollistaisi kolonoskopian standardisaation. Toimenpide olisi mahdollista saada nopeammaksi ja helpommin ohjattavaksi, mikä vähentäisi silmukointia, kolonoskopistien työkuormaa sekä huomaamatta jääneiden polyyppien määrää. Lisäksi ergonomian parantuminen vähentäisi kolonoskopistien tuki- ja liikuntaelinvammoja. [7], [11], [19]–[22]

Vielä on kuitenkin epäselvyyttä palveluntarjoajille syntyvästä kustannushyöty-suhteesta. Uuden kaluston ostaminen on kallista, mutta vähentynyt potilaiden epämukavuus voisi vähentää rauhoittavien lääkkeiden tarvetta. Tämän kautta toimenpiteessä tarvittavien työntekijöiden määrä vähentyisi ja potilaat palautuisivat toimenpiteestä nopeammin. Lisäksi kolonoskopistien koulutuksen helpottuessa, palveluntarjoajat saisivat lisää ammattipäteviä kolonoskopisteja, mikä puolestaan voisi



Kuva 3.1: Robottikolonoskopian mahdolliset hyödyt

vähentää uusitun kolonoskopiatuskimuksen tarvetta. [9], [19], [21], [22]

3.2 Haasteet

Jotta robottikolonoskooppi voitaisiin ottaa yleiseen käyttöön suolistosyövän seulonnassa ja korvata perinteinen kolonoskooppi, sen täytyy pystyä tarjoamaan mahdollisuus diagnosointiin sekä hoidollisiin toimenpiteisiin. Lisäksi sen tulisi vastata perinteisen kolonoskopian kohtaamiin ongelmiin. Robottikolonoskopiaan liittyy kuitenkin monia haasteita, kuten lokalisaatio, liikkumismekanismi, ympäristöystävällisyys, hinta ja autonomisuus. [21]

Lokalisaatiolla tarkoitetaan laitteen sijaintia ja orientaatiota sen ympäristössä. Se voi olla suhteellinen, eli arvio laitteen sijainnista suhteutettuna anatomiaan, tai absoluuttinen, eli laitteen tarkka sijainti ja orientaatio. Tähän on olemassa erilaisia ratkaisuja, kuten magneetti, ultraääni, radiotaajuus sekä konenäkö, jolla tarkoitetaan automaattiseen kuvankäsittelyyn perustuvaa teknologiaa. [21] Magneettista lokalisaatiota käsitellään tarkemmin luvussa 4.

Robottikolonoskopian liikkumismekanismit voidaan jakaa aktiiviseen ja passiiviseen, missä aktiivinen tarkoittaa kolonoskopistin ohjaamaa kolonoskooppia ja passiivinen tarkoittaa, ettei siihen käytetä ulkoista ohjausmekanismia. Passiivisella liikkumismekanismilla viitataan pääsääntöisesti kapseliendoskopiaan, jossa ruuansulatuskanavan peristaltiikka, eli aaltomainen liike, kuljettaa kapseliendoskooppia eteenpäin. Tämän vuoksi se ei tarvitse kolonoskopistia erikseen ohjaamaan sen kulkua, se saattaa kuitenkin johtaa siihen, että polyyppeja jää huomaamatta. Aktiivinen liikkumismekanismi voidaan jakaa kahteen osaan, sisäisesti ohjattuun (engl. internally actuated) ja ulkoisesti ohjattuun (engl. externally actuated). Sisäisesti ohjatulla liikkumismekanismilla tarkoitetaan, että kolonoskooppi on suoraan vuorovaikutuksessa ympäristöönsä esimerkiksi renkailla, propellilla tai kiinnittymismekanismilla. [7], [11], [20], [21] Ulkoisesti ohjatulla liikkumismekanismilla tarkoitetaan, että kolonoskoopin liikkumista ohjaa ulkoinen mekanismi, kuten magneettikenttä. Sen haasteena on esimerkiksi kolonoskoopin lokalisaatio sen ympäristössä. [12]–[15], [21], [24]–[26]

Terveydenhuolto on vastuussa 4,4 %:sta koko maailman hiilijalanjäljestä, josta endoskopia on kolmanneksi korkein hiilijalanjäljentuottaja terveydenhuollon sisällä. Tämän vuoksi on tärkeää ottaa huomioon ympäristöystävällisyys, kun kehitetään uusia laitteita endoskopiaan, kuten kolonoskopiaan. Endoskopian hiilijalanjälki koostuu suuresta dekontaminaation resurssitarpeesta, monimutkaisista jätevirroista ja suuresta riippuvuudesta kertakäyttöesineisiin. Kertakäyttöinen endoskooppi ei tarvitse uudelleen käsittelyä, mutta sen ympäristöystävällisyyteen vaikuttaa sen tuo-

tanto, kuljetus, hävitys ja kierrätysmahdollisuudet. Uudelleenkäytettävä endoskooppi ei vaadi vaihto-osien uudelleen hankkimista, mutta se täytyy aina toimenpiteen jälkeen käsitellä uudestaan. Uudelleenkäsittely vaatii noin 80–100 litraa vettä, sekä paljon sähköä, lämpöä, desinfiointiaineita ja pesuaineita jokaisella käsittelyllä. [27] Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole tarpeeksi tutkimustietoa, jotta voitaisiin verrata kertakäyttöisen ja uudelleen käytettävän endoskoopin ympäristöystävällisyyttä.

Monille robottikolonoskoopeille ei ole tehty terveystaloustieteen tutkimusta, jolla voitaisiin arvioida niiden lopullista taloudellista vaikutusta [21]. Tällä hetkellä suurin osa robottikolonoskoopeista on vielä kehitys ja tutkimus vaiheessa. Monet näistä eivät pysty korvaamaan perinteistä kolonoskooppia kaikilla osa-alueilla sekä lisäksi tarjota turvallisemman ja mukavamman toimenpiteen sekä potilaille että kolonoskopisteille. Tällä hetkellä palveluntarjoajilla on tarvittavat resurssit perinteiseen kolonoskopiitutkimukseen. Sen korvaaminen robottikolonoskoopilla ei ole järkevää taloudellisesta näkökulmasta, jos se ei voi tuottaa perinteisellä kolonoskoopilla suoritettavia toimenpiteitä ja korjata sen kohtaamia ongelmia.

Perinteisessä kolonoskopiassa on erilaisia ongelmia, joihin robottikolonoskopia voisi tuoda ratkaisun. Sen on tulevaisuudessa mahdollista luoda potilaille turvallisempi ja mukavampi toimenpide muuttamalla kolonoskoopin liikuttamistapaa ja erityisesti lisäämällä kolonoskoopin automatisaatiota. Kolonoskopisteille robottikolonoskopia luo mahdollisuuden nopeampaan ja helpompaan koulutukseen, jonka kautta myös kolonoskopian standardisaatioon. Liikuttamistavan muuttaminen helpottaisi ohjattavuutta sekä työskentelyn ergonomiaa. Lisäksi robottikolonoskopia luo mahdollisuuden kustannustehokkaampaan suolistosyövän seulontaan. Monilla robottikolonoskopian laitteilla on vielä haasteita, jotka estävät niiden käyttöönoton perinteisen kolonoskopian tilalla. Näitä ovat muun muassa kolonoskoopin lokalisaatio, liikkumismekanismi, ympäristöystävällisyys ja taloudellinen kannattavuus.

4 Magneettikolonoskopia

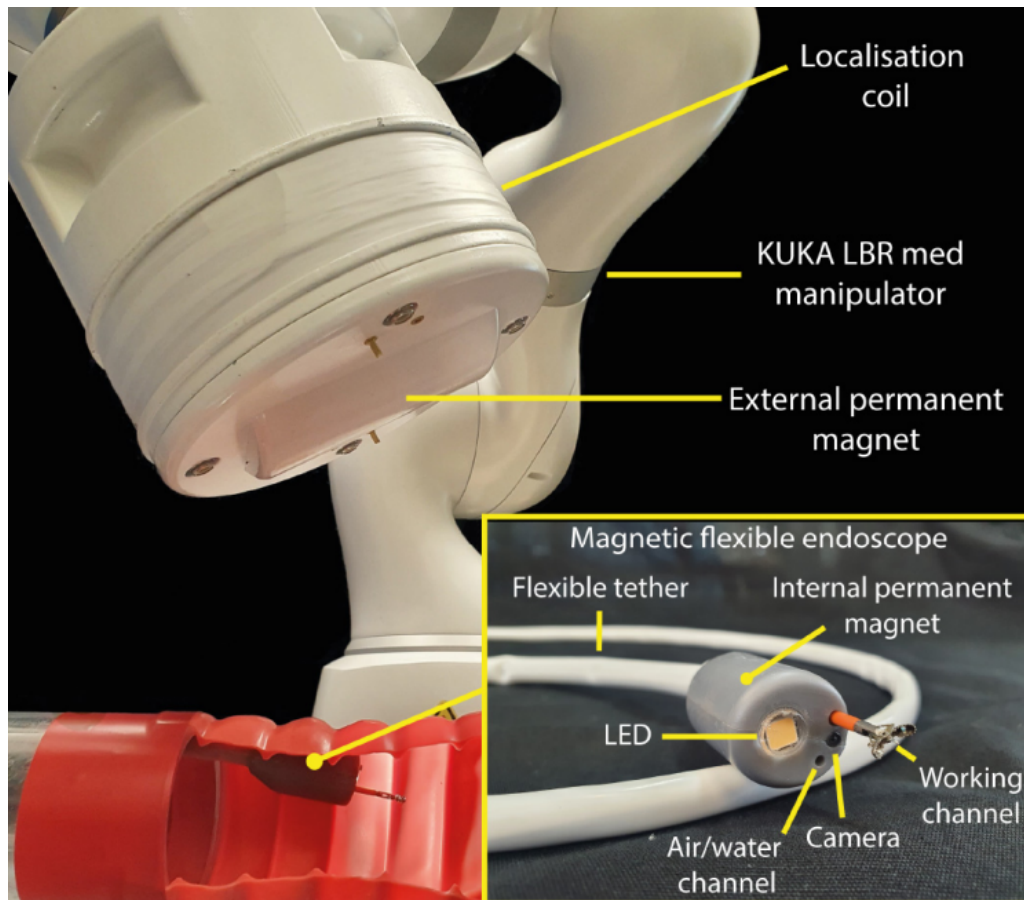
Magneettikolonoskopiolla tarkoitetaan minimaalisesti invasiivista tekniikkaa, jolla voidaan tutkia perä- ja paksusuoli suolistosyövän varalta. Magneettinen ohjaus luo kolonoskopiatutkimuksesta mukavamman sekä potilaille että kolonoskopisteille. Magneettikolonoskopia on vielä tutkimusvaiheessa ja siihen liittyy erilaisia haasteita, kuten ohjattavuus, autonomisuus ja stabilisaatio. [14], [15], [24]

Luvussa käsitellään magneettikolonoskoopin rakenne Martin et. al. tutkimusryhmän laitteen perusteella [14], [15] sekä magneettikolonoskopiasta syntyviä hyötyjä. Lisäksi tarkastellaan magneettikolonoskopian kohtaamia haasteita ja niihin kehitetyjä ratkaisuja.

4.1 Rakenne ja hyödyt

Magneettikolonoskooppi koostuu kolmesta pääyksiköstä, jotka ovat joustava lieka ja kapseli, robottikäsi ja työskentelytaso. Yleiskatsaus rakenteesta esitellään kuvassa 4.1. [14], [15] Suurin hyöty magneettisesti liikutettavissa roboteissa on mahdollisuus miniaturisaatioon, sillä kolonoskoopin kärkeen ei tarvita monimutkaisia ja kookkaita liikkuttamismekanismeja. [25] Magneettikolonoskopia luo mahdollisuuden helpompaan koulutukseen ja parempaan työergonomiaan kolonoskopisteille. [12]–[14]

Magneettikolonoskopiassa liekaa ei tarvita tuottamaan kolonoskoopin liikettä, joten siitä on voitu rakentaa joustava [14], [15]. Tämä vähentää suolistonseinämien



Kuva 4.1: Yleiskatsaus magneettikolonoskoopin rakenteesta. [15]

venymistä ja sitä kautta potilaiden tuntemaa kipua ja epämukavuutta toimenpiteen aikana. Liean päädyssä sijaitsee kapseli, joka sisältää perinteisen kolonoskoopin tavoin LED valaistuksen, työskentelykanavat, sekä kameran [14], [15]. Kapseli sisältää sisäisen kestmagneetin [14], [15], Hall-efektianturit ja inertiamittausyksikön, joita käytetään kolonoskoopin lokalisaatioon [15].

Robottikäsi, jota kutsutaan myös nimellä KUKA LBR Med, mahdollistaa siihen sulautetun ulkoisen kestmagneetin avulla sisäisen kestmagneetin liikuttamisen koko vatsan alueella [14], [15]. Ulkoisen kestmagneetin ympärillä on sähkömagneettinen kela, joka mahdollistaa yhdessä Hallin ilmiön ja inertiamittausyksiköstä saadun datan avulla reaaliaikaisen arvion kapselin sijainnista ja orientaatiosta suolistossa [15].

Kolonoskopistin työskentelytasoon kuuluu videomonitori sekä robottikäsi-ohjain. Videomonitorilta näkyy kapselin kuvaama video sekä erilaisia hyödyllisiä parametreja, kuten nopeus ja magneettien välinen etäisyys. Martin et. al. magneetikolonoskoopin tapauksessa tarkoitetaan sauvaohjainta, jonka avulla robottikäsi-ohjain liikettä ohjataan. [14], [15] Kyseessä on teleoperoitu robottikolonoskopia, jolla tarkoitetaan, että kolonoskopisti ei ole suorassa kontaktissa potilaaseen ohjattaessa kolonoskoopin liikettä [12].

Magneettinen ohjaus tekee kapselin ohjaamisesta tarkempaa ja luotettavampaa. Lisäksi magneettinen ohjaus venyttää suolistonseinämää vähemmän, mikä puolestaan vähentää potilaan kipua, epämukavuutta ja perforaation riskiä. [12]–[14], [25], [26] Tekoälyn integroiminen ohjelmistoon mahdollistaisi automaattisen polyypin havainnoinnin, jolloin huomaamatta jääneiden polyypien osuus vähentyisi. [12], [24] Erillinen ja ergonomisesti optimoitu työskentelypiste luo kolonoskopisteille mukavamman työskentely-ympäristön. Työskentelyasennon parantuminen sekä vähentynyt voimankäytön tarve vähentäisi kolonoskopistien tuki- ja liikuntaelin vammoja. [12]–[14] Lisäksi magneetikolonoskopia vähentäisi kouluttautumiseen tarvittavaa aikaa ja hintaa [14], [15] sekä tarvittavien työntekijöiden määrää [24], [26].

4.2 Haasteet

Johtuen ohjattavuuden haasteista, magneetikolonoskoopit eivät ole vielä kliinisessä käytössä. Syntyneet magneetikentät ovat epälineaarisia verrattuna laitteen liikkeeseen, mikä johtaa epäintuitiiviseen ohjaukseen. [14] Edistyminen on enimmäkseen tapahtunut navigoinnin parantamisessa huolimatta merkittävistä parannuksista autonomisuudessa ja laitteen hallinnassa. Toimenpiteet, kuten biopsia, polyypin poistaminen ja klipsien asettaminen ovat merkittävä osa kolonoskopian toimenpidekokonaisuutta. Näiden osalta kehitystä on tapahtunut vain vähän, koska ongelmana on riittävä ohjaus ja stabilisaatio magneetikolonoskoopien hoidollisissa tehtävissä.

sä. [24] Magneettikolonoskopian haasteita ja niihin kehitettyjä ratkaisuja esitellään tiivistetysti taulukossa 4.1.

Mukautuva taaksepäin astuva ohjaus on kehitetty välttämään kontaktia suolistonseinämän ja mutkien kanssa. Ohjaus vähentää suolistonseinämän venymisestä aiheutuvaa kipua saavuttamalla sisäisen kestromagneetin levitaation. Lähestymistapa ottaa huomioon kaikki systeemiin kohdistuvat epävakaudet, mutta nykyinen lokalisatio systeemi ei ole tarpeeksi nopea voidakseen taata koko sisäisen kestromagneetin dynamiikan käsittelyn. [25]

Magneettikolonoskopiassa yksi suurimpia haasteita on kolonoskoopin lokalisatio sen ympäristössä, minkä kautta sen navigaatio ja ohjattavuus. Ongelmaan on kehitetty ratkaisu, joka perustuu älykkääseen ohjausstrategiaan. Magneettikolonoskoopin käyttöä voidaan kuvailla kolmella eri tasolla, jotka ovat suora robottiopeeraatio, älykäs teleoperaatio ja semiautonominen navigaatio. Suoralla robottiopeeraatiolla tarkoitetaan, että kolonoskopisti on vastuussa navigoinnista ja magneettikenttien vuorovaikutuksien ohjaamisesta. Älykkäällä teleoperaatiolla tarkoitetaan, että kolonoskopisti keskittyy pelkästään navigaatioon, kun systeemi huolehtii magneettikentän kontrolloinnista. Semiautonomisella navigaatiolla tarkoitetaan, että systeemi huolehtii kokonaan liikkeestä, jossa kolonoskopisti valvoo sekä tarvittaessa ohittaa autonomisenohjauksen. Älykäs teleoperaatio ja semiautonominen navigaatio suoriutuu paremmin kuin perinteinen kolonoskopia, kun verrataan kokemattomien ja vasta kouluttautuneiden kolonoskopistien tuloksia. Semiautonominen navigaatio vähentää myös kolonoskopistien henkistä ja fyysistä kuormaa. [14]

Toistaiseksi tutkimus on keskittynyt enimmäkseen magneettikolonoskoopin kliinisen suorituskyvyn parantamiseen. Biopsia on kuitenkin tärkeä osa kolonoskopia-tutkimuksessa, mutta magneettikolonoskopian ongelmana on ylläpitää kolonoskoopin vakautta ja tasapainoa toimenpiteen aikana. Semiautonominen rutiini tarkoittaa systeemiä, joka voi toimia autonomisesti tietyillä ehdoilla. Tämä rutiini yhdis-

Haaste	Ratkaisumenetelmä	Menetelmän toiminta	Hyöty	Lähde
Kontakti suolistonseinämän kanssa	Mukautuva taaksepäin astuva ohjaus	Saavuttaa sisäisen kestmagneetin levitaation	Kivuttomampi toimenpide potilaille	[25]
Kolonoskoopin lokalisaatio, navigaatio ja ohjattavuus	Älykäs ohjausstrategia: älykäs teleoperaatio	Systeemi huolehtii magneettikentästä käyttäjän huolehtiessa navigaatiosta	Intuitiivisempi ohjattavuus ja vähentynyt huomion jakautuminen	[14]
Kolonoskoopin lokalisaatio, navigaatio ja ohjattavuus	Älykäs ohjausstrategia: semiautonominen navigaatio	Systeemi huolehtii magneettikentästä ja navigaatiosta	Intuitiivisempi ohjattavuus, vähentynyt huomion jakautuminen sekä työn henkinen ja fyysinen kuormittavuus	[14]
Kolonoskoopin vakaus ja tasapaino biopsian aikana	Semiaautonominen rutiini	Kohteen autonominen tunnistaminen ja kohdistaminen	Vähentää kognitiivista työtaakkaa ja toimenpiteen kestoa	[15]
Magneettikenttien vuorovaikutuksen epälineaarisuus	Mallipohjainen lineaarinen parametrimuuttuva ohjaus	Lineaarinen dynaaminen malli magneettien etäisyyksille, jotka muuttuvat järjestelmän dynamiikan suhteen	Vakauttaa kolonoskoopin ja parantaa biopsien tarkkuutta	[24]
Vaikea navigaatiojärjestelmä	Voima-anturit ja oppiva reaaliaikainen A* -algoritmi	Voima-anturit keräävät tietoa magneettien välisestä vetovoimasta, jota hyödynnetään oppivan reaaliaikaisen A* -algoritmin reitinsuunnittelussa	Nopeampi toimenpide ja parantaa navigaatiota	[26]

Taulukko 4.1: Magneettikolonoskopian haasteet ja ratkaisut

tää monia elementtejä, jotka yhdessä tunnistavat ja kohdistavat autonomisesti kohteeseen. Kun magneettikolonoskoopi on kohdistettuna, kolonoskopistia kehoitetaan suorittamaan biopsia. Rutiini vähentää kolonoskopistin kognitiivista työtaakkaa ja on ajallisesti verrattavissa perinteiseen kolonoskopiaan. Rutiinia ei ole vielä tutkittu in-vivo-mallissa, jossa voi aiheutua epätarkkuuksia oletuksesta, että kohde pysyisi paikoillaan. [15]

Magneettikolonoskopia perustuu magneettikenttien vuorovaikutukseen, mikä on epälineaarista ja riippuu paljon magneettien välisestä etäisyydestä. Magneettikolonoskoopin vakauttamiseksi toimenpiteitä varten ehdotetaan myös mallipohjaista lineaarista parametrimuuttuvaa ohjausta. Sillä tarkoitetaan, että magneettikolonos-

koopille saadaan magneettien etäisyyksille lineaariset dynaamiset mallit, joita kuvaavat parametrit muuttuvat hitaasti järjestelmän dynamiikan suhteen. Tekniikka kykenee vakauttamaan kolonoskoopin ulkoisista häiriötekijöistä huolimatta. Metodi parantaa biopsien tarkkuutta ja mahdollistaa, että toimenpiteeseen tarvitaan vain yksi työntekijä. Tulevaisuudessa metodi pyritään integroimaan tekoälyn tai edellä mainitun semiautonominen rutiinin kanssa. [24]

Manuaalinen navigaatiojärjestelmä on riippuvainen kolonoskopistin kokemuksesta, minkä vuoksi on tutkittu autonomista navigaatiojärjestelmää. Tutkimuksessa käytettiin magneettisesti avustettua kolonoskopia -järjestelmää, joka poikkeaa aiemmin mainitusta magneettikolonoskoopin rakenteesta, jossa ei käytetä voimaan perustuvaa anturitekniikkaa. Magneettisesti avustetussa kolonoskopia -järjestelmässä käytetään seurantatekniikkaa, jossa hyödynnetään voima-antureja (engl. load cell) ja oppivaa reaaliaikaista A* -algoritmia (LRTA*, engl. learning real-time A* algorithm) reitinhakua varten. Voima-anturien seurantafunktion tarkkuus vaikuttaa lupaavalta ja ulkoinen pysyvä magneetti pystyy magneettisesti kytkeytymään sisäiseen kesto-magneettiin. Lisäksi sensori-informaatio auttaa estämään sisäisen kestromagneetin aiheuttamat riskit suolenseinämälle. LRTA*-algoritmi ja heuristinen evaluaatio parantaa autonomiseen navigaation liittyviä ongelmia magneettikolonoskoopeissa. [26]

Sisäisen kestromagneetin levitaatio sekä liikuttamismekanismien mahdollistama miniaturisaatio ja liean joustavuus, mahdollistavat potilaille mukavamman ja kivuttomamman toimenpiteen. Se voisi myös vähentää kolonoskopiaan liittyviä huolia ja pelkoja. Liikuttamismekanismi luo myös kolonoskopisteille ergonomisemman työskentelyasennon ja siten vähentäisi työperäisiä tuki- ja liikuntaelinvammoja. Lisääntynyt autonomian, tekoälyn ja algoritmien rooli magneettikolonoskopiassa mahdollistaa nopeamman ja helpomman koulutuksen, mikä lisäisi ammattipätevien kolonoskopistien määrää. Biopsiatoimenpiteen kehittäminen tulevaisuudessa on tärkeää, jotta magneettikolonoskopiolla olisi mahdollisuus korvata perinteinen kolonoskopia.

5 Magneettikolonoskopia suolistosyövän seulonnassa

Lääkäreiden työn kuormittavuus on pysynyt lähes samana viime vuosina ja tavallimmat kuormitustekijät ovat jatkuva kiire, paine tekemättömistä töistä sekä toimimattomat tekniset laitteet ja ohjelmat. Lisäksi joka viidennellä lääkäriellä on kohonnut riski työuupumukseen. [28] Suolistosyövän seulonnan aloittaminen koko maassa vuonna 2022 60–68-vuotiaille on lisännyt seulonnan työtaakkaa, joka kasvaa seulonnan laajentuessa 56–74 vuotiaisiin. Tämä rasittaa jo valmiiksi ruuhkautunutta terveydenhuoltoa Suomessa. Myös nuorempien suolistosyöpätapaukset ovat lisääntyneet, mikä laajentaa kolonoskopian tarvetta. Terveydenhuollon ruuhka ja työntekijöiden uupumus voivat viivästyttää potilaiden pääsyä tutkimuksiin. Luvun tarkoituksena on käsitellä mahdollisuutta korvata perinteinen kolonoskopia magneettikolonoskopialla sujuvoittamaan Suomen suolistosyövän seulontaa.

Suurin hyöty perinteisen kolonoskoopin korvaamisesta magneettikolonoskoopilla suolistosyövän seulonnassa esiintyy sen kyvyssä luoda kivuttomampi ja mukavampi toimenpide sekä vähentää silmukoinnin ja perforaation riskiä. Magneettikolonoskopian miniaturisaatio ja joustava insertioputki luovat vähemmän invasiivisen vaihtoehdon perinteiselle kolonoskopialle. Kapselin levitaatio ja magneettinen liikuttamismekanismi vähentää suolenseinämän venymistä. Kivuttomampi ja mukavampi kolonoskopia voisivat vähentää potilaiden negatiivisia ajatuksia toimenpiteestä ja

sitä kautta nostaa seulontaan osallistuvien potilaiden määrää. Tämä edistäisi onnistuneempia toimenpiteitä ja ajoissa huomattuja polyyppejä sekä alentaisi suolistosyövän kuolleisuutta. Lisääntynyt osallistuneisuus kuitenkin lisää kolonoskopistien työtaakkaa.

Automaation lisääminen magneetikolonoskopiaan helpottaisi kolonoskopistien työtaakkaa. Tällöin kolonoskopistit voisivat keskittyä suolenseinämän havainnointiin. Tekoälyn integraatio helpottaisi myös vaikeammin havaittavissa olevien polyyppien havaitsemista ja diagnosointia. Tämä johtaisi koulutuksen helpottumiseen, minkä kautta toimenpiteen standardisaatioon ja onnistuneempiin toimenpiteisiin. Kolonoskopistien kognitiivinen työtaakka vähentyisi luoden kolonoskopisteille vähemmän kuormittavan työympäristön. Lisääntynyt ammattipätevyys ja ammattilaisten määrä helpottaisi vastaamaan kasvavaan seulonnan tarpeeseen sekä mahdolliseen osallistujamäärän kasvuun.

Kehitysvaiheessa olevan magneetikolonoskopian haasteet estävät sen käytön suolistosyövän seulonnassa. Tällä hetkellä magneetikolonoskopia tarjoaa mahdollisuuden vain diagnostiseen kolonoskopiaan, mutta ei hoidolliseen. Tämä tarkoittaisi polyyppihavainnon jälkeen suolen uudelleen tutkimista perinteisellä kolonoskoopilla. Magneetikolonoskopia ei pysty korvaamaan perinteistä kolonoskopiaa metodina, jolla voidaan tutkia ja tarvittaessa operoida perä- ja paksusuoleissa.

Magneetikolonoskoopin kustannustehokkuudesta ei ole tehty tutkimusta. Lisääntynyt ammattipätevyys voisi tehdä seulonnasta tehokkaampaa ja onnistuneempaa. Magneetikolonoskoopin hankkiminen on kuitenkin kallista, eikä se tällä hetkellä pysty tarjoamaan parempaa vaihtoehtoa perinteiselle kolonoskoopille. Suomen hyvinvointialueiden rahoitusta on leikattu, minkä vuoksi uuteen laitteeseen investoiminen on epätodennäköistä. Lisäksi tulisi ottaa huomioon, että nykyisen laitteen parantaminen lisäosalla voisi olla huomattavasti kustannus- ja ympäristöystävällisempää kuin kokonaan uudenlaitteen hankkiminen.

Magneetikolonoskopiolla olisi mahdollisuus tarjota kivuttomampi ja mukavampi diagnosoiva toimenpide. Ergonomian ja toimenpiteen helpottuminen voisi helpottaa kolonoskopistien työtaakkaa ja kouluttautumista. Magneetikolonoskopia ei kuitenkaan vielä voi kokonaan korvata perinteistä kolonoskopiaa, joten hyvinvointialueiden investoiminen laitteeseen olisi taloudellisesta näkökulmasta epätodennäköistä. Laitteen hankkiminen ei olisi ympäristöystävällisestä näkökulmastaan järkevää, sillä se ei pysty korvaamaan perinteistä kolonoskopiaa kokonaan. Tutkimuksen jatkuessa ja magneetikolonoskopian kehittyessä, sillä voi silti tulevaisuudessa olla mahdollisuus tarjota potilaille kivuttomampi ja mukavampi suolistosyövän seulonta.

6 Yhteenveto

Tutkielman tavoitteena oli selvittää, mitä robottikolonoskopia ja magneettikolonoskopia ovat sekä, miten magneettikolonoskopiaa voitaisiin hyödyntää Suomen suolistosyövän seulonnassa. Perinteisen kolonoskopian korvaavien menetelmien tutkimisen tärkeys korostuu perinteisen kolonoskopian kohtaamien ongelmien ja suolistosyövän tapausten kasvamisen myötä. Robottikolonoskopian ratkaisut voivat tutkimuksen kehittyessä tarjota ratkaisun etenkin kivuttomampaan toimenpiteeseen.

Robottikolonoskopia tarkoittaa perinteisen kolonoskoopin korvaamista laitteella, joka tukee kolonoskopistia tietokoneavusteisesti. Robottikolonoskopian ratkaisuja on monia, mutta kaikki tavoittelevat mukavampaa toimenpidettä. Potilaat voisivat saada kivuttoman, mukavamman ja turvallisemman toimenpiteen, mikä helpottaisi tutkimuksen suorittamista ja potilaiden halua osallistua tutkimukseen. Kolonoskopistit puolestaan voisivat saada miellyttävämmän toimenpiteen, paremman työergonomian ja intuitiivisemmän laitteen. Palveluntarjoajat puolestaan voisivat saada standardisoidun toimenpiteen ja lisääntyvän määrän ammattipäteviä kolonoskopisteja. Robottikolonoskopian laitteilla on kuitenkin vielä monia haasteita. Vielä on vaikea sanoa, mikä tutkimuksessa olevista robottikolonoskopian laitteista voisi helpottaa suolistosyövän seulontaa. Laitteen tulisi olla hintalaatusuhteeltaan järkevä, jotta se toteuttaa edellä mainitut hyödyt, mutta on myös palveluntarjoajille kustannustehokas. Lisäksi tulee ottaa huomioon ympäristöystävällisyys, johon ei tällä hetkellä ole kiinnitetty huomiota.

Magneettikolonoskopiolla tarkoitetaan robottikolonoskopian alaluokkaa, joka voi tutkia minimaalisen invasiivisesti perä- ja paksusuolen. Magneettikolonoskopian magneettinenohjaus luo mahdollisuuden miniaturisaatioon ja joustavaan kolonoskopian rakenteeseen. Autonomian ja tekoälyn rooli kasvaa ja luo kolonoskopisteille työympäristön, jossa he voivat keskittyä enemmän potilaan hoitamiseen kolonoskoopin liikuttamisen sijaan. Vaikka magneettikolonoskoopin ohjaus luo mahdollisuuden mukavampaan toimenpiteeseen sekä potilaalle että kolonoskopistille, se ei tällä hetkellä pysty korvaamaan perinteistä kolonoskopiaa hoidollisissa toimenpiteissä. Lisäksi magneettikolonoskopian tuottamiseen tarvitaan kokonaan uusi järjestelmä, jonka ympäristöystävällisyydestä eikä taloudellisesta kannattavuudesta ole tehty vielä tutkimusta. Nämä ovat tärkeitä osa-alueita tutkimukselle hoidollisten toimenpiteiden kehityttyä.

Suolistosyövän seulonnan laajeneminen Suomessa ja kasvavat suolistosyöpätapaukset alle 50-vuotiaissa lisäävät ruuhkautuneen terveydenhuollon työtaakkaa entisestään. Magneettikolonoskopian liikuttamismekanismi voisi luoda kivuttomamman toimenpiteen ja vähentää kolonoskopistien työkuormaa autonomian helpottaessa ohjausmekanismia. Magneettikolonoskopia ei kuitenkaan korvaa kokonaan perinteistä kolonoskopiaa, jolloin sen taloudellinen kannattavuus ei olisi palveluntarjoajille järkevää. Hyvinvointialueiden rahoituksen leikkauksen myötä voisi ajatella, että nykyisen kolonoskoopin parantaminen lisäosalla voisi olla kustannustehokasta palveluntarjoajille, mutta myös parantaa potilaiden mukavuutta.

Tutkielma osoittaa, että magneettikolonoskopiolla voi olla mahdollisuus tarjota kivuttomampi ja mukavampi toimenpide tulevaisuudessa hoitotoimenpiteiden kehityksen myötä. Tulevaisuudessa on kuitenkin otettava huomioon palveluntarjoajien taloudellinen tilanne ja laitteen ympäristöystävällisyyteen olisi syytä tehdä kattavampaa tutkimusta. Tulevaisuudessa suolistosyöpätapauksien ennustetaan lisääntyvän, joten kolonoskopian kehittämisen ja tutkimisen tärkeys kasvaa.

Lähdeluettelo

- [1] T. Sawicki, M. Ruszkowska, A. Danielewicz, E. Niedźwiedzka, T. Arłukowicz ja K. E. Przybyłowicz, ”A Review of Colorectal Cancer in Terms of Epidemiology, Risk Factors, Development, Symptoms and Diagnosis”, *Cancers*, vol. 13, s. 2025, 2021. DOI: 10.3390/cancers13092025.
- [2] World Health Organization. ”Colorectal cancer”. (2023), url: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/colorectal-cancer> (viitattu 14.10.2024).
- [3] J. Tian, K. O. Afebu, A. Bickerdike, Y. Liu, S. Prasad ja B. J. Nelson, ”Fundamentals of Bowel Cancer for Biomedical Engineers”, *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 51, s. 679–701, 2023. DOI: 10.1007/s10439-023-03155-8.
- [4] P. Österlund. ”Suolistosyöpä (ohutsuolen, paksusuolen ja peräsuolen syövät)”. (2023), url: <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk01087> (viitattu 22.10.2024).
- [5] World Health Organization, *IARC Handbooks of Cancer Prevention Volume 17: Colorectal Cancer Screening*, (Viitattu: 2024-10-22), 2018. url: https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr256_E.pdf.
- [6] M. Maida, D. S. Dahiya, Y. R. Shah et al., ”Screening and Surveillance of Colorectal Cancer: A Review of the Literature”, *Cancers*, vol. 16, s. 2746, 2024. DOI: 10.3390/cancers16152746.

- [7] B. Vucelic, D. Rex, R. Pulanic et al., "The Aer-O-Scope: Proof of Concept of a Pneumatic, Skill-Independent, Self-Propelling, Self-Navigating Colonoscope", *Gastroenterology*, vol. 130, s. 672–677, 2006. DOI: 10.1053/j.gastro.2005.12.018.
- [8] A. Eickhoff, R. Jakobs, A. Kamal, S. Mermash, J. Riemann ja J. Vam Dam, "In vitro evaluation of forces exerted by a new computer-assisted colonoscope (the NeoGuide Endoscopy System)", *Endoscopy*, vol. 38, s. 1224–1229, 2006. DOI: 10.1055/s-2006-945014.
- [9] M. Shike, Z. Fireman, R. Eliakim et al., "Sightline ColonoSight system for a disposable, power-assisted, non-fiber-optic colonoscopy (with video)", *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 68, s. 701–710, 2008. DOI: 10.1016/j.gie.2007.12.062.
- [10] E. Tumino, "Endotics system vs colonoscopy for the detection of polyps", *World Journal of Gastroenterology*, vol. 16, s. 5452, 2010. DOI: 10.3748/wjg.v16.i43.5452.
- [11] S. Groth, D. K. Rex, T. Rösch ja N. Hoepffner, "High Cecal Intubation Rates With a New Computer-Assisted Colonoscope: A Feasibility Study", *American Journal of Gastroenterology*, vol. 106, s. 1075–1080, 2011. DOI: 10.1038/ajg.2011.52.
- [12] F. Bianchi, G. Ciuti, A. Koulaouzidis et al., "An innovative robotic platform for magnetically-driven painless colonoscopy", *Annals of Translational Medicine*, vol. 5, s. 421, 2017. DOI: 10.21037/atm.2017.09.15.
- [13] A. P. Mamunes, F. Campisano, J. Martin et al., "Magnetic flexible endoscope for colonoscopy: an initial learning curve analysis", *Endoscopy International Open*, vol. 9, s. 171–180, 2021. DOI: 10.1055/a-1314-9860.

- [14] J. W. Martin, B. Scaglioni, J. C. Norton et al., "Enabling the future of colonoscopy with intelligent and autonomous magnetic manipulation", *Nature Machine Intelligence*, vol. 2, s. 595–606, 2020. DOI: 10.1038/s42256-020-00231-9.
- [15] J. W. Martin, L. Barducci, B. Scaglioni et al., "Robotic Autonomy for Magnetic Endoscope Biopsy", *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 4, s. 599–607, 2022. DOI: 10.1109/TMRB.2022.3187028.
- [16] Suomen syöpärekisteri, *Suolistosyövän seulonta*. url: <https://syoparekisteri.fi/seulonta/suolistosyovan-seulonta/> (viitattu 22. 10. 2024).
- [17] M. Rönty, "Hamartooma", *Lääketieteellinen Aikakausikirja Duodecim*, vol. 136, s. 516–520, 2020.
- [18] D. Adler ja J. G. Lieb, *Core Concepts in Colonoscopy*. Taylor & Francis Group, 2014, s. 1–11. DOI: 10.1201/9781003523307-1.
- [19] A. Trecca, F. Catalano, A. Bella ja R. Borghini, "Robotic colonoscopy: efficacy, tolerability and safety. Preliminary clinical results from a pilot study", *Surgical Endoscopy*, vol. 34, s. 1442–1450, 2020. DOI: 10.1007/s00464-019-07332-6.
- [20] N. Gluck, A. Melhem, Z. Halpern, K. Mergener ja E. Santo, "A novel self-propelled disposable colonoscope is effective for colonoscopy in humans (with video)", *Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 83, s. 998–1004, 2016. DOI: 10.1016/j.gie.2015.08.083.
- [21] C. Winters, V. Subramanian ja P. Valdastrì, "Robotic, self-propelled, self-steerable, and disposable colonoscopes: Reality or pipe dream? A state of the art review", *World Journal of Gastroenterology*, vol. 28, s. 5093–5110, 2022. DOI: 10.3748/wjg.v28.i35.5093.

- [22] G. Ciuti, K. Skonieczna-Żydecka, W. Marlicz et al., "Frontiers of Robotic Colonoscopy: A Comprehensive Review of Robotic Colonoscopes and Technologies", *Journal of Clinical Medicine*, vol. 9, s. 1648, 2020. DOI: 10.3390/jcm9061648.
- [23] A. A. Plumb, A. Ghanouni, S. Rainbow et al., "Patient factors associated with non-attendance at colonoscopy after a positive screening faecal occult blood test", *Journal of Medical Screening*, vol. 24, s. 12–19, 2017. DOI: 10.1177/0969141316645629.
- [24] L. Barducci, B. Scaglioni, J. Martin, K. L. Obstein ja P. Valdastri, "Active Stabilization of Interventional Tasks Utilizing a Magnetically Manipulated Endoscope", *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 9, s. 854081, 2022. DOI: 10.3389/frobt.2022.854081.
- [25] L. Barducci, G. Pittiglio, J. C. Norton, K. L. Obstein ja P. Valdastri, "Adaptive Dynamic Control for Magnetically Actuated Medical Robots", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, s. 3633–3640, 2019. DOI: 10.1109/LRA.2019.2928761.
- [26] H.-E. Huang, S.-Y. Yen, C.-F. Chu, F.-M. Suk, G.-S. Lien ja C.-W. Liu, "Autonomous navigation of a magnetic colonoscope using force sensing and a heuristic search algorithm", *Scientific Reports*, vol. 11, s. 16491, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-95760-7.
- [27] K. Siau, B. Hayee ja S. Gayam, "Endoscopy's Current Carbon Footprint", *Techniques and Innovations in Gastrointestinal Endoscopy*, vol. 23, s. 344–352, 2021. DOI: 10.1016/j.tige.2021.06.005.
- [28] Lääkäriliitto, *Työaika ja työhyvinvointi, Lääkärin työolot ja terveys tutkimus 2024*, https://www.laakariliitto.fi/site/assets/files/5229/tyoaika_final_210125_1.pdf, (Viitattu: 2024-02-17), 2024.