

Memristorit robotiikassa

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Fil. yo. Tuomo Pihlasto
Tarkastaja:
Prof. Petriina Paturi

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Pihlasto, Tuomo Memristorit robotiikassa

LuK-tutkielma, 16 s.

Fysiikka

Helmikuu 2025

Tutkielmassa luodaan yleiskatsaus robotiikan, memristoreiden toimintaan ja memristorien tuomien etujen yhteyttä robotiikassa. Aluksi käsitellään robotiikan nykytilaa sekä sen vaatimuksia ja rajoitteita. Tämän jälkeen perehdytään memristorien ominaisuuksiin ja niiden tuomiin hyötyihin erilaisissa järjestelmissä. Memristorit, jotka muistuttavat biologisia synapseja, voivat merkittävästi edistää robottien oppimiskykyä, havaintokykyä ja navigointitehokkuutta. Memristoreiden kyky oppia ja muistaa aiempia tiloja sekä niiden rakenteelliset edut, kuten nanomittakaavan elektroniset laitteet ja energiatehokkuus, nostetaan esiin.

Tutkielman pääpaino on memristorien sovellusten tutkimuksessa ja niiden vertailemisessa nykyisiin robotiikan järjestelmiin. Memristoreihin perustuvat neuromorfiset järjestelmät voivat merkittävästi parantaa robottien havainnointia, navigointia, ohjausta ja oppimista. Työssä esitellään myös uusia, täysin memristoripohjaisia järjestelmiä, jotka voivat tarjota innovatiivisia ratkaisuja robotiikassa. Lisäksi käsitellään hybridiratkaisujen mahdollisuuksia, jotka yhdistävät perinteisiä ja memristoripohjaisia teknologioita, ja tuovat parannuksia nykyisiin robotiikan järjestelmiin helpouden ja suorituskyvyn osalta. Erityisesti neuromorfisten järjestelmien ja hybridiratkaisujen avulla voidaan saavuttaa entistä joustavampia ja energiatehokkaampia robotteja.

Lopuksi tarkastellaan ratkaisujen haasteita nykyhetkessä ja tulevaisuudessa, erityisesti luotettavuuden, kestävyys, yhteensopivuuden ja integroinnin näkökulmista. Vaikka memristorien integrointi nykyisiin robotiikan järjestelmiin tuo mukanaan haasteita, kuten teknologian kehitysvaihe ja massatuotannon esteet, niiden tarjoamat pitkän aikavälin edut, kuten parantunut kestävyys ja vähemmän huoltoa vaativat järjestelmät, tekevät niistä lupaavan tutkimusalueen. Työssä pohditaan myös energiankäytön kasvavaa trendiä ja tulevia tutkimusalueita robotiikan ja memristorien kentällä.

Asiasanat: Memristori, robotiikka, neuromorfinen elektroniikka, synapsit

Sisällys

Johdanto	1
1 Robotiikka	2
1.1 Nykytila	2
1.2 Vaatimukset	2
2 Memristorit	4
2.1 Ominaisuudet	4
2.2 Edut perinteisiin toteutuksiin	5
3 Memristorien sovellukset robotiikassa	6
3.1 Hybridiratkaisut	10
4 Memristorien haasteet ja tulevaisuuden tutkimus	11
4.1 Yhteensopivuus ja integrointi nykyisiin järjestelmiin	11
4.2 Luotettavuus ja kestävyys	12
4.3 Tulevaisuus	12
5 Johtopäätökset	14

Johdanto

Tämän tutkielman aiheeksi on valittu memristorien käyttö robotiikassa. Aiheen valintaan on vaikuttanut aikaisempi ICT-insinöörin koulutukseni, valitsemani kokeellisen fysiikan osaamispolku sekä kiinnostukseni robotiikan ja uusien teknologioiden tutkimiseen. Aihe on myös ajankohtainen, sillä memristoreista tehdään tällä hetkellä tutkimusta Turun yliopistolla fysiikan ja tähtitieteen laitoksella. Niiden mahdollisia käyttökohteita robotiikassa olisi hyvä tutkia sekä miettiä miten memristoreilla voitaisiin parantaa nykyhetken robotiikkaa ja huomioida ne myös tulevaisuuden robotiikan suunnittelussa.

Robotiikka on vielä kehittyvä teknologia-alue, joka yhdistää useita tieteenaloja, kuten mekaniikkaa, elektroniikkaa, ohjelmointia ja tekoälyä. Yksi robotiikan haasteista on luoda järjestelmiä, jotka pystyvät oppimaan ja sopeutumaan muuttuviin olosuhteisiin. Perinteiset elektroniikan komponentit ovat olleet alalla keskiössä, mutta nykyään niiden tuomat rajoitteet ja teknologian kehitys ovat antaneet suunnan uusille ratkaisuille. Yksi näistä ratkaisuista on memristori, jota tässä tutkielmassa käydään läpi. Memristori on uudenlainen elektroniikkakomponentti, jolla yritetään ratkaista robotiikan haasteita. Memristori poikkeaa tavallisista komponenteista siten, että se muistaa aiemmat tilansa ja pystyy säilyttämään informaation niistä myös ilman virtaa.

Tutkielmassa käydään läpi robotiikan nykytilaa, sen rajoitteita ja kehityskohteita. Erityisesti keskitytään memristorien ominaisuuksiin ja niiden tuomiin etuihin robotiikan sovelluksissa. Tutkielmassa käsitellään myös memristorien erilaisia sovelluksia robottien aistijärjestelmien, muistin ja päätöksenteon kehittämisessä sekä erilaisten neuroverkkojen ja algoritmien tukena. Lopuksi käydään nopeasti läpi tulevaisuuden käyttökohteita ja kehityssuuntaa. Tutkielmassa on käytetty tekoälyä lähdemateriaalien tiedon tiivistämiseen ja etsimiseen sekä kielentarkistukseen.

1 Robotiikka

Robotiikka avustaa ihmistä teollisuuden prosesseissa, kuten tehostaa automaatioita, suorittaa toistuvia ja vaarallisia tehtäviä sekä kerää valmistustietoja. Robotiikan käytöllä on tärkeä rooli korkealaatuisen tuotannon ylläpitämisessä ja kustannusten alentamisessa [1]. Eduista huolimatta robotiikka vaatii merkittäviä alkuinvestointeja, erityisiä olosuhteita ja ylläpitoa, mutta nykyisellään ihmisen päätöksenteko ja luovuus ovat edelleen korvaamattomia [1].

1.1 Nykytila

Perinteinen CMOS-teknologiaan (CMOS engl. complementary metaloxide semiconductor) perustuvat osat rajoittuvat kasvavan virrantarpeen, tehotehden ja valmistushinnan kanssa, joihin memristorit tuovat hyvän vaihtoehdon [2]. Von Neumannin pullonkaulana tunnettu laskentatehon yläraja luo ongelmia robotiikan kehitykselle. Perinteinen robotiikka kärsii korkeasta kulutuksesta ja latenssista datan siirrossa prosessorien ja muistin välillä [2]. Tällä hetkellä neurorobotit on varustettu edistyneillä dynaamisilla näköantureilla (DVS engl. dynamic vision sensor), joille on tunnusomaista korkean resoluution ominaisuudet ja matala latenssi [3]. Nämä anturit toimivat tehokkaina ajallisen muutoksen ilmaisimina ja löytävät sovelluksia erilaisiin visuaalisiin tehtäviin, kuten liikkeen arviointiin, navigointiin, paikantamiseen ja seurantaan [1, 3].

1.2 Vaatimukset

Neuromorfinen elektroniikka jäljittelee robottien sensorisia, kognitiivisia, itseoppivia ja aktivoivia toimintoja. Toiminnot on perinteisesti toteutettu jäykällä piillä, mutta nyt myös orgaanisia ja joustavia elektronisia materiaaleja käytetään. Piipohjaiset neuromorfiset järjestelmät, kuten dynaamiset näköanturit ja jännitepiikkineu-

roverkot (SNN engl. spiking neural network) tarjoavat korkean resoluution, matalan latenssin toiminnan ja tehokkaan ajallisen muutoksen havaitsemisen. Näiden järjestelmien käyttökohteita ovat esimerkiksi liikkeen arviointi, navigointi ja seuranta. Piipohjaiset järjestelmät vaativat kuitenkin usein monimutkaisia ja kalliita valmistusprosesseja, mikä tekee niistä vähemmän sopivia fyysistä joustavuutta ja biyhteensopivuutta vaativiin sovelluksiin. [3]

Orgaanisten materiaalien ja niihin liittyvien teknologioiden kehittyminen mahdollistavat niiden käytön orgaanisessa neuromorfisessa elektroniikassa. Orgaanisilla materiaaleilla voidaan saavuttaa erilaisia etuja neuromorfisessa elektroniikassa, kuten viritettävyyttä, vakautta, alhaisempaa virrankulutusta ja fyysistä joustavuutta. Nämä materiaalit mahdollistavat keinotekoisien synapsien ja dynaamisten näköanturien kehittämisen, joiden avulla voidaan toteuttaa monimuotoista aistinvaraista laskentaa. Neuromorfiset elektroniset laitteet ovat siis ihanteellisia robottien havaitsemiseen, navigointiin ja ohjaukseen, koska ne myös tarjoavat viritettävyyden, vakauden, alhaisen virrankulutuksen ja mukautuvat substraatit. [3]

Pehmeille roboteille on tunnusomaista niiden muotoiltavuus, jota ohjaa jatkuva mekaniikka [4]. Tämä dynaaminen muotoiltavuus erottaa ne perinteisistä jäykistä roboteista. Pehmeät robotit ovat joustavia, yhteensopivia ja mukautuvia, mutta niillä on ongelmia mallintamisessa, kalibroinnissa ja ohjauksessa niiden epälineaarisuuden ja hystereesin vuoksi [5]. Koneoppiminen on erityisen hyödyllistä pehmeässä robotiikassa, koska pehmeiden materiaalien ominaisuuksia on hankala mallintaa etukäteen [4]. Sensorien karakterisoinnissa hyödynnetään sensorien raaka-dataa hallituissa laboratorio-olosuhteissa, jotta saadaan selville sensorin ominaisuudet, kuten resoluutio, toimintaetäisyys ja herkkyys [4]. Systeemin karakterisointi keskittyy enemmän ylemmän tason haasteisiin, kuten kohteen tunnistamiseen ja otteen onnistumiseen, samalla välttäen sensorien karakterisoinnissa käytettyä suoraa määrittelyä [4].

2 Memristorit

Memristorit ovat kaksinapaisia laitteita, joiden johtavuutta voidaan moduloida virran avulla [6]. Niitä käytetään robotiikassa usein mallintamaan biologisia synapseja. Memristorit tyypillisesti koostuvat yläelektrodista, resistiivisestä kytkentäkerroksesta ja alaelektrodista [7]. Näiden kerrosten luomiseen käytetään erilaisia valmistusmenetelmiä, kuten atomikerrospinnoitusta ja kemiallista höyrypinnoitusta [7]. Toisin kuin vastukset, kondensaattorit ja induktorit, memristorin resistanssi voi muuttua sen läpi kulkeneen virran historian perusteella, muistaen tehokkaasti aiemmat tilat, vaikka virta katkaistaan. Tämä ominaisuus tekee memristoreista erityisen hyödyllisiä sovelluksissa haihtumattomassa muistissa (engl. non-volatile memory) ja neuromorfisessa laskennassa [8]. Erilaisia memristoreja ja niiden kaltaisia neuromorfisia laitteita ovat esimerkiksi ENODE (engl. Electrochemical neuromorphic organic device) ja FTJ (engl. ferroelectric tunnel junction). Memristorit luokitellaan lateraaliin, pystysuuntaisiin ja heteroliitosrakenteisiin, joilla jokaisella on ainutlaatuiset mekanismit, kuten vikojen migraatio, faasimuutos, tyhjien tilojen muodostuminen ja filamenttien muodostus [9].

2.1 Ominaisuudet

Memristori tarjoaa toiminnallisen suhteen varauksen ja magneettivuon välillä [8]. Sen käytökselle on ominaista epälineaarinen suhde virran ja jännitteen integraalien välillä [8]. Memristorien orgaaniset synapsityypit perustuvat niiden eri tiedonkuljetusmekanismeihin. Tiedonkuljettajamekanismeina on esimerkiksi elektrokemiallinen metallisaatio, valenssielektronien vaihto, faasin vaihto, ferroelektrinen ja hapetuspelkistys-reaktioon perustuva [2]. Memristorit voivat vaihtaa korkean ja matalan resistanssin tilojen välillä, jolloin ne voivat toimia haihtumattomana muistina nopeilla kytkentänopeuksilla ja suurella tiheydellä [7]. Niiden korkea dynaaminen varianssi ja kynnyskytkentä mahdollistavat niiden käytön sekä tilalliseen logiikkaan että

neuromorfisiin sovelluksiin [10]. Nämä ominaisuudet mahdollistavat, että perinteinen haihtuva muisti voitaisiin korvata haihtumattomalla, suuritiheyksisellä muistilla [10]. Memristorien ominaisuudet voivat tukea synaptisia toimintoja, kuten jännitepiikkien ajasta riippuvaa plastisiteettia (STDP engl. spike-timing-dependent plasticity) [6].

2.2 Edut perinteisiin toteutuksiin

Memristanssi syntyy luonnollisesti nanomittakaavan järjestelmissä, joissa elektroni- ja ionikuljetus on kytketty ulkoisen esijännitteen alaisena [2, 8, 11]. Ne ovat lupaavia biologisten synapsien mallintamiseen niiden nanometriä kokoluokan mittakaavan, kyvyn tallentaa useita bittejä ja alhaisen energiantarpeen vuoksi [12]. Näin ne voivat jäljitellä todellisten synapsien biofysiikkaa ja dynamiikkaa [12]. Näillä löydöillä on suuri kehittävä vaikutus nanomittakaavaisiin elektronisiin laitteisiin, erityisesti piirien toiminnallisuuden parantamiseen ja ultratiheiden, puoliksi haihtumattomien muistien ja synapsien kaltaisten toimintojen mahdollistamiseen oppimisverkoissa [8, 13, 14]. Memristoreiden käyttö neuromorfisissa laitteissa on lupaavaa niiden yksinkertaisen rakenteen, energiatehokkuuden, skaalautuvuuden, nopeuden sekä pienen teollisen jalanjäljen ja yksinkertaisen valmistusprosessin vuoksi [15]. Memristoreita voidaan käyttää tilallisissa logiikkapiireissä yhdistämällä logiikka ja muisti energiankulutuksen vähentämiseksi, minimoimalla tiedonsiirto ja päivitysenergia [10]. Biologisten synapsien toimintaa jäljittelevää rakennetta hyödyntävät memristorit toimivat neuroverkkojen perustana olevien matriisilaskutoimitusten tehokkaina toteuttajina [11].

Haihtuvia memristoreita voidaan myös käyttää valitsimina muistiryhmissä vaihtamaan vuotovirtareittien (engl. sneak-path) virtoja [16]. Niitä käytetään jo keinotekoisien hermosolujen ja synapsien jäljittelemiseen aivojen kaltaisissa laskentajärjestelmissä [16].

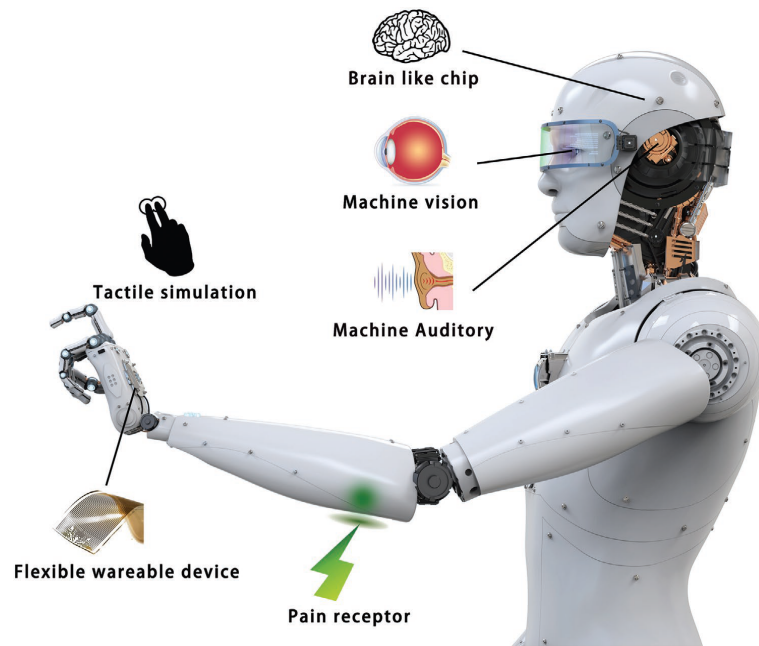
3 Memristorien sovellukset robotiikassa

Memristoreja hyödyntävä neuromorfinen elektroniikka edistyy myös robotiikassa [7]. Robottien sensorisia, kognitiivisia, itseoppivia ja toimintatoimintoja jäljittelevä neuromorfinen elektroniikka on osoittanut merkittävää potentiaalia robottien havainnoinnin, navigoinnin ja ohjauksen edistämiseksi [3]. Näitä erilaisia memristorien käyttökohteita on esitetty kuvassa 1. Memristorien samankaltaisuus biologisiin synapseihin tekee niistä sopivia neuromorfisiin laskentajärjestelmiin [2, 8, 11, 13]. Keskeisiä tässä lähestymistavassa ovat muistilaitteet, jotka onnistuvat jäljittelemään biologisten hermosolujen synaptisia toimintoja [9, 12, 17].

Neuromorfiset järjestelmät jäljittelevät biologisia hermoverkkoja ja tarjoavat kompakteja ja energiatehokkaita tiedonkäsittelyominaisuuksia, jotka ylittävät perinteisten von Neumann -arkkitehtuurien rajoitukset [11, 18]. Ihmisaivojen hermoverkon inspiroima neuromorfinen laskenta pyrkii voittamaan perinteisten arkkitehtuurien rajoitukset matkimalla aivojen erittäin tehokkaita ja rinnakkaisia prosessointiominaisuuksia [2, 9, 12, 17]. Neuromorfisen laskennan tavoitteena on vangita hermolasennan periaatteet keskittyen laitteistoon, neurobiologisten rakenteiden jäljittelemiseksi [3]. Näitä rakenteita jäljitellään käyttämällä transistoreista ja muista elektronisista komponenteista koostuvia erittäin suuren mittakaavan integraatiopiirejä (VLSI engl. very large-scale integration) [3].

Yksi memristori voi toimia muistilaitteena tallentamaan synaptinen paino, kun taas useamman memristorin ryhmä voi järjestäytyä edustamaan synaptista painomatriisia neuroverkossa [19]. Tällainen multimemristiivinen synapsien arkkitehtuuri käyttää useita muistilaitteita edustamaan yhtä synaptista painoa, mikä lisää synapsien dynaamista aluetta ja resoluutiota [20]. Tämä synapsiarkkitehtuuri on merkittävä askel kohti tehokkaita, laajamittaisia neuromorfisia laskentajärjestelmiä [20].

Nykyiset neuromorfiset järjestelmät ovat vahvasti riippuvaisia niissä käytettävistä ohjelmistoista, mutta memristoreita käyttävät laitteistototeutukset voivat vähen-



Kuva 1. Memristorien erilaiset käyttökohteet robotiikassa [7].

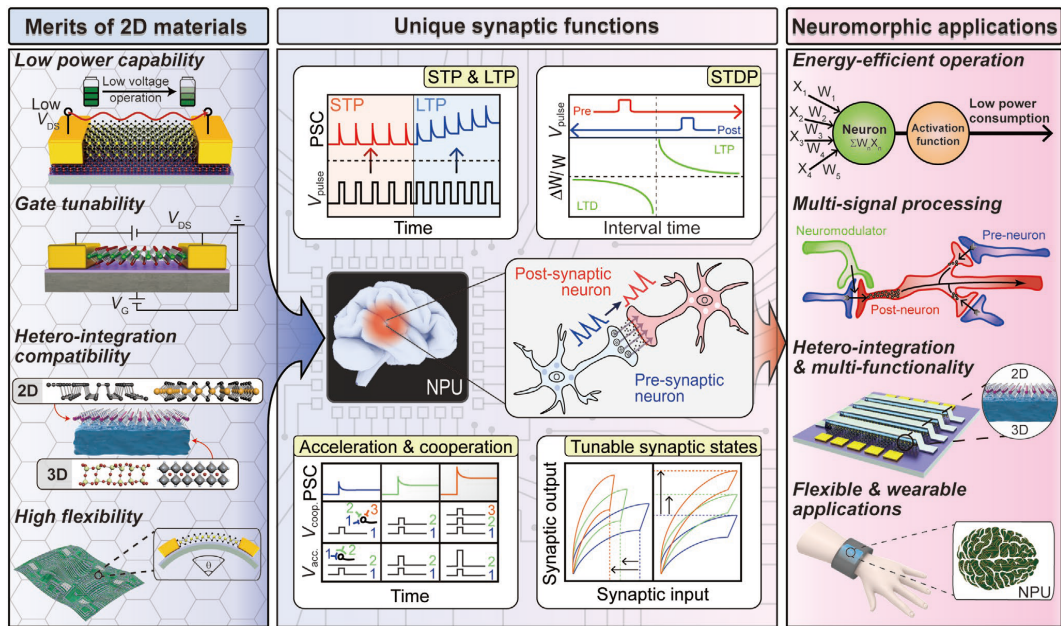
tää virrankulutusta merkittävästi [10]. Energiatohokkuuden parantamiseksi neuromorfisissa ratkaisussa tärkeimpänä on laitteiden rakenteellinen optimointi ja memristorien tilojen vaihtamiseen tarvittavan energian (engl. switching energy) vähentäminen [2]. Muita edistysaskeleita ovat memristiivisten keinoitekoisten synapsien ja neuronien kehittäminen, jotka ovat ratkaisevan tärkeitä energiatahokkaalle neuromorfiselle laskennalle [2, 8, 13, 15]. Memristoripohjainen järjestelmä tarjoaa potentiaalia energiatahokkaille reunalaskentalaitteille, reaaliaikaiselle diagnoosille, kuvien luokittelulle ja puheentunnistukselle [15]. Neuromorfiset sensorilaitteet ovat olennaisia komponentteja neurorobotisessa järjestelmässä, ja ne ovat vastuussa ulkoisten, optisten tai mekaanisten signaalien muuntamisesta sähköisiksi pulsseiksi, joita keskitetyt neurorobotiset aivot tai hajautetut älykkyyssyköt voivat havaita ja käsitellä [3].

Memristoreja käytävissä synaptisissa laitteissa on sovelluksia hahmontunnistukseen, logiikkatoimintoihin, assosiatiiviseen oppimiseen ja suodatukseen [9, 17]. Nämä ominaisuudet ovat ratkaisevan tärkeitä tehokkaiden neuromorfisten järjestelmien

rakentamisessa. Synaptisten laitteiden potentiaalia voidaan hyödyntää sovelluksiin robotiikassa, konenäössä, puheentunnistuksessa, tuntohavainnoissa, lääketieteessä ja kognitiivisessa prosessoinnissa [7]. Synaptiset laitteet luokitellaan sähköstimuloituihin, optisesti stimuloituihin ja valosähköisiin synergisiin laitteisiin käytetyn stimulaation tyyppin mukaan (sähköiset tai optiset signaalit) [17]. ENODE voi jäljitellä synaptisia toimintoja, kuten pitkäaikaista plastisiteettia (LTP engl. long term plasticity), lyhytaikaista plastisiteettia (STP engl. short term plasticity) ja jännitepiikkien ajasta riippuvaa plastisiteettia (STDP) [21]. Myös FTJ-memristorit voivat jäljitellä keskeisiä synaptisia toimintoja matkimalla biologisten synapsien käyttäytymistä [22]. Synaptisten toimintojen jäljittelyyn käytetään erilaisia mekanismeja, kuten ionien kulkeutumista, ferrosähköisiä vaikutuksia, vaiheen muutosta ja kantoaallon sieppausta ja vapauttamista [17]. Kuvassa 2 on esitetty memristorin rakenteen tuomia hyötyjä, ominaisuuksia ja biologisia järjestelmiä matkivia toiminnallisia applikaatioita.

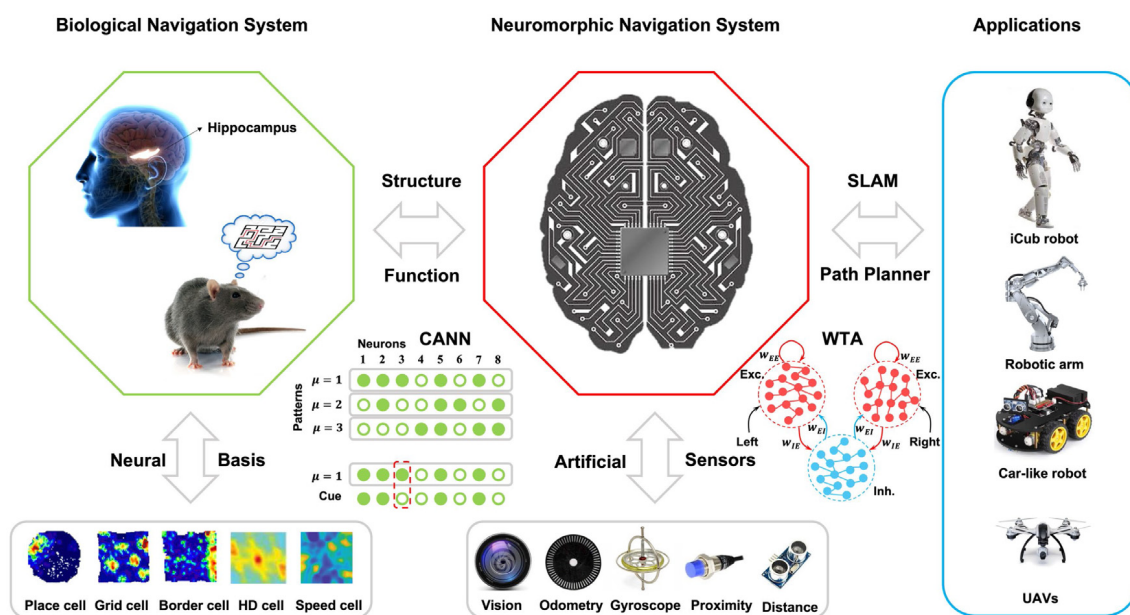
Memristiiviset laitteet, jotka tallentavat tietoa resistanssitiiloissaan, ovat lupaavia edustamaan synaptisia painoja keinotekoisissa neuroverkoissa (ANN engl. artificial neural network) ja jännitepiikkipohjaisissa neuroverkoissa (SNN) [20]. Memristorit voivat jäljitellä biologisia synapseja ja hermosoluja, mikä tekee niistä ihanteellisia jännitepiikkipohjaisiin neuroverkkoihin, jotka ovat energiatehokkaampia ja kompaktimpia kuin perinteiset keinotekoiset hermoverkot [7]. Memristorit soveltuvat myös keinotekoisiiin neuroverkkoihin, koska ne pystyvät konfiguroitumaan dynaamisesti uudelleen sähköisten impulssien perusteella [2].

Yksi suuri memristorien käyttökohde on neuromorfisissa SLAM-järjestelmissä (engl. simultaneous localization and mapping), jotta robotit voivat navigoida ja luoda karttoja tuntemattomista ympäristöistään tehokkaasti. Nämä järjestelmät käyttävät jännitepiikkineuroverkkoja aistisyötteiden käsittelyyn ja robotin sijainnin ja suunnan arvioimiseen [23]. Energiatehokkaiden memristorien hyödyntä-



Kuva 2. Memristorin rakenteen tuoma etu alhaisesta tehonkulutuksesta ja muokattavuudesta. Memristorin biologisia järjestelmiä matkivia ominaisuuksia, kuten STP, LTP, STDP ja synaptisten tilojen tuunattavuutta sekä neuromorfisia applikaatioita [9].

minen SLAM-järjestelmissä on keskeistä niiden alhaisen virrankulutuksen vuoksi, mikä tekee niistä soveltuvia mobiilirobotiikan ja drone-tekniikan sovelluksiin [24]. Memristoreita käytetään myös neuromorfisissa algoritmeissa reitin suunnitteluun, määrittämään lyhimät ja tehokkaimmat reitit roboteille [3]. Ne mahdollistavat mukautuvien ohjausstrategioiden toteuttamisen, joiden avulla robotit voivat navigoida monimutkaisissa ympäristöissä ja välttää esteitä jopa reaaliajassa [1, 3, 5]. Memristorit yhdistettynä erilaisiin oppimisen algoritmeihin parantavat siis robotin kykyä oppia vuorovaikutuksesta ympäristön kanssa ja parantavat sen suorituskykyä ajan myötä, vahvistusoppimisen ja muiden mukautuvien mekanismien avulla [1, 3–5]. Kuvassa 3 verrataan neuromorfisen navigaatiojärjestelmän rakennetta biologiseen järjestelmään, ja esitetään neuromorfisen järjestelmän erilaisia käyttökohteita.



Kuva 3. Keinotekoisista sensoreista muodostuva neuromorfinen navigaatiojärjestelmä ja sen rakennetta ja toimintoja vastaava biologinen, neuroneista koostuva navigointijärjestelmä. Neuromorfisen navigaatiojärjestelmän sovelluksia, kuten robottikoura, automaattinen robotti ja UAV (engl. unmanned aerial vehicle), jotka on toteutettu käyttäen SLAM-järjestelmiä ja reitin suunnittelua. [3].

3.1 Hybridiratkaisut

Neuromorfista elektroniikkaa sisältävät järjestelmät hyödyntävät sekä piipohjaisia että orgaanisia materiaaleja tehokkaiden, vähätehoisten ja mukautuvien robottijärjestelmien luomiseksi [3]. Orgaanisesta elektroniikasta on tulossa lupaava vaihtoehto pii-elektroniikkaan neurorobottisissa sovelluksissa alhaisempien kustannustensa ja helpompien käsittelyolosuhteiden vuoksi [3]. Memristorit yhdistetään orgaanisten elektronisten materiaalien kanssa joustavien ja bioyhteensopivien neuromorfisten piirien luomiseksi. Nämä piirit voidaan integroida esimerkiksi pehmeisiin robotteihin ja puettaviin laitteisiin, mikä mahdollistaa uusia sovelluksia ihmisen ja robotin vuorovaikutuksessa ja lääketieteellisessä robotiikassa [3, 5]. Piipohjaista ja orgaanista neuromorfista elektroniikkaa kehitetään erilaisiin sovelluksiin, mukaan lukien dynaamiset näköanturit ja keinotekoiset synapsit [7]. Nämä tekniikat tarjoavat viritettävyyttä, vakautta, alhaista virrankulutusta ja joustavuutta, mikä tekee niistä sopivia

integroitaviksi jo kehitettyihin robottijärjestelmiin [7].

Memristoreiden integrointi tietokonejärjestelmiin voi merkittävästi parantaa neuroverkkojen suorituskykyä [7]. Vaikka memristori-pohjaiset ratkaisut eivät täysin korvaa nykyisiä robottiratkaisuja, voivat ne integroituna huomattavasti parantaa niiden energiatehokkuutta [2]. Memristoreita on integroitu dynaamisiin näköantureihin (DVS) ja muihin anturilaitteisiin parantamaan robotin kykyä havaita ja tulkitta visuaalista tietoa [25]. Nämä anturit muuntavat dynaamiset muutokset valon intensiteetissä sähköisiksi signaaleiksi, jotka sitten käsitellään neuromorfisissa piireissä [25]. Memristoreilla parannellut anturit auttavat vähentämään tietojen redundanssia ja parantamaan visuaalisten antureiden ajallista resoluutiota, mikä tekee niistä sopivia nopeaan objektien seurantaan ja liikkeen arviointiin [3]. Näiden anturien tuoma hyöty olisi erittäin tärkeä autonomisissa roboteissa, kuten itseajavissa autoissa.

Hybridi-memristori-CMOS-neuromorfinen piiri yhdistää kompaktin, vähän virtaa vaativan memristoreiden tallennustilan ja CMOS-piirien yksityiskohtaisen synaptisen dynamiikan [12]. Tämän hybridilähestymistavan tavoitteena on luoda aivojen inspiroimia laskentajärjestelmiä, jotka ovat vikasietoisia ja kestäviä vaihtelulle [12]. Komplementaaristen metallioksidipuolijohteiden neuronien yhdistäminen memristorisynapseihin voi luoda erittäin yhteenliitettyjä ja tiheitä neuromorfisia piirejä, mikä saattaa parantaa laskentatehoa [6].

4 Memristorien haasteet ja tulevaisuuden tutkimus

4.1 Yhteensopivuus ja integrointi nykyisiin järjestelmiin

Memristoripohjaiset logiikkapiirit voivat olla kompaktimpia ja energiatehokkaampia kuin perinteiset CMOS-piirit, vaikka ne vaativatkin monimutkaisempia toimintasarjoja [10]. ENOD-pohjaiset laitteet voidaan valmistaa joustaville alustoille, mikä tekee niistä sopivia integroitavaksi joustaviin elektronisiin järjestelmiin ja kolmiu-

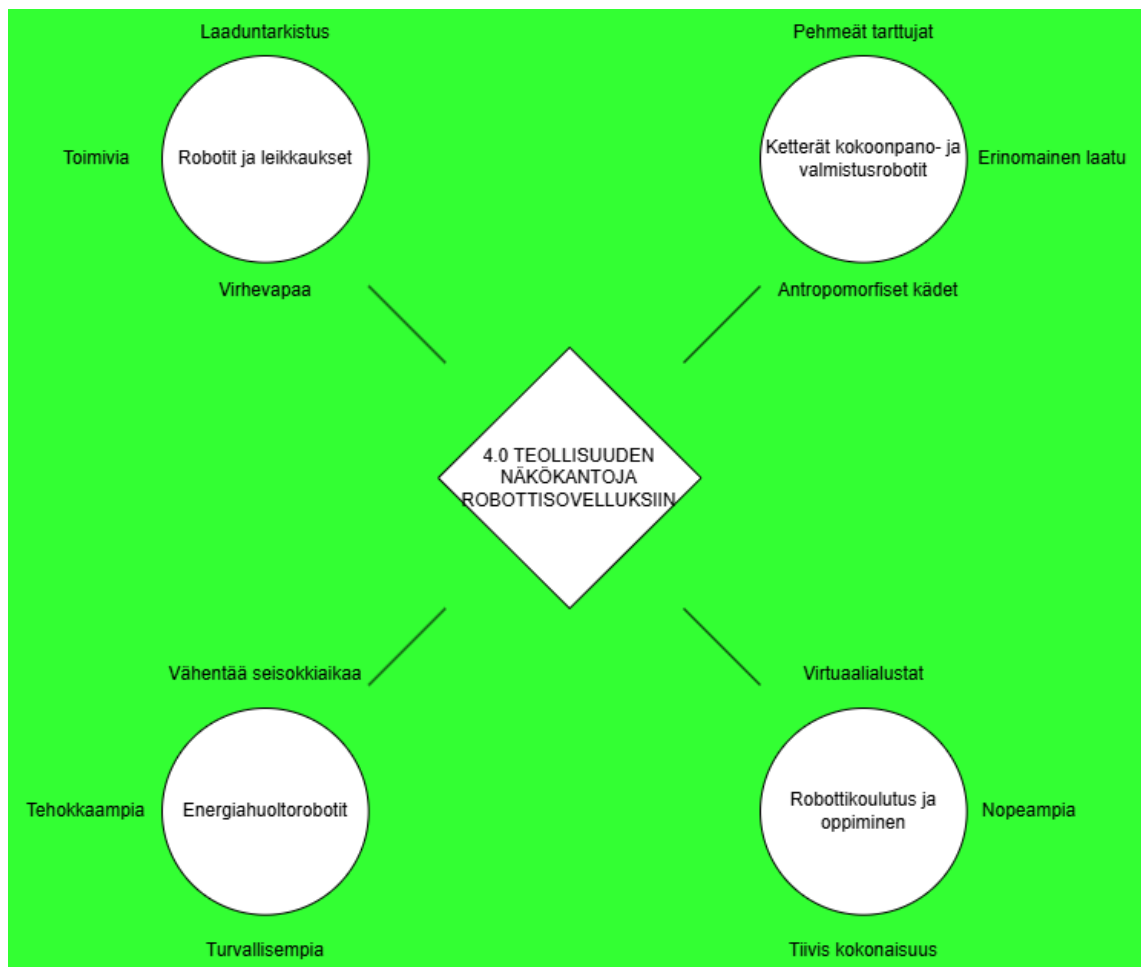
lotteisiin arkkitehtuureihin [21]. Ne ovat osoittaneet myös potentiaalia edulliseen valmistukseen ja bioyhteesopivuuteen [21]. ENODea voidaan käyttää neuromorfisessa tietojenkäsittelyssä, implantoitavissa proteeseissa, neuroelektrodiryhmissä ja muissa joustavissa laaja-alaisissa elektronisissa järjestelmissä [21]. Sen toimivuus on osoitettu Pavlovin oppimista emuloivassa piirissä ja neuroverkkosimulaatioissa kuvantunnistukseen ja tietojen luokitteluun [21]. Kuvassa 4 on esitetty memristorien mahdollistamia parannuksia jo käytössä oleviin robotiikan sovelluksiin.

4.2 Luotettavuus ja kestävyys

Memristoreiden monista mahdollisuuksista huolimatta, laitteiden luotettavuus, energiankulutus ja resistanssin muutoksen epälineaarisuus luovat edelleen haasteita niiden käytössä [15]. Yleisesti memristoreissa on luotettavuusongelmia, kuten suurta variaatiota, epäluotettavuutta vaihtoprosesseissa, jotka vaikeuttavat erityisesti suuren mittakaavan memristoreihin perustuvien robottijärjestelmien rakentamista [15]. Materiaalien ja valmistustekniikoiden kehitys parantaa jatkuvasti memristorien vauhtia ja suorituskykyä, mutta materiaalien laatua, vikasuunnittelua ja passiivointitekniikoita on edelleen parannettava [7]. Prosessien vaihtelevuus ja rajoitettu resoluutio muistitiloissa luovat haasteita nanomittakaavaisten ristikkorakenteiden valmistuksessa [12].

4.3 Tulevaisuus

Memristorit ovat keskeinen osa neuromorfisia järjestelmiä, joissa niitä käytetään niin prosessoreissa kuin myös erilaisissa ohjaus- ja muistitoiminnoissa [15]. Tämä monipuolisuus on edistänyt memristoriteknologian soveltamista käytännön laitteisiin [15]. Kaiken kaikkiaan neuromorfisen elektroniikan, kuten memristorien integrointi robotiikkaan edistää älykkäiden robottijärjestelmien kehitystä, jotka voivat oppia, mukautua ja olla vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa reaaliajassa, mikä tekee



Kuva 4. Robotiikan käyttökohteet ja memristorien mahdollistamat parannukset sovelluksiin. Kuva perustuu lähteeseen [1].

niistä tehokkaampia ja autonomisempia [3].

Tulevaisuudessa on useita eri tutkimussuuntia, mukaan lukien uusien työkalujen kehittäminen SNN-mallien prototyyppien tekemiseen, uusien laitteiden ja materiaalien integrointi, neurorobottien miniatyyrisointi ja neurorobotiikan eettisten vaikutusten tutkiminen [3]. Yhdessä tutkimussuunnassa keskitytään parantamaan memristoreiden valoherkkyyttä ja muistikykyä sekä kehittämään uusia materiaaleja ja rakenteita [17]. Tavoitteena on myös vähentää häiriöitä, kuten loisvirtoja [17]. 2D-materiaalipohjaiset memristorit voivat tulevaisuudessa auttaa kehittämään energiatehokasta neuromorfista laskentaa, joustavaa elektroniikkaa ja kehittyneitä

sovelluksia, kuten neuromorfisia sensorijärjestelmiä ja bioelektronisia lääkkeitä [9]. Yleisesti tulevaisuuden neuromorfisen elektroniikan ja memristoreiden tutkimus keskittyy parantamaan niiden suorituskykyä, skaalautuvuutta ja integrointia muihin teknologioihin [7].

5 Johtopäätökset

Digitaalisen datan ja toimintojen eksponentiaalinen kasvu johtaa kestävämpään energiankulutukseen. Vuoteen 2040 mennessä tietojenkäsittelyn energiatarve voi ylittää maailmanlaajuisen energiantuotannon [10]. Neuromorfisten järjestelmien mahdollisuudet muuttaa tietojenkäsittelyä ja robotiikkaa ovat valtavat, ja ne lupaavat älykkäämpiä, tehokkaampia ja mukautuvampia teknologioita monenlaisiin sovelluksiin [7].

Vaikka memristori-pohjaiset ratkaisut eivät täysin korvaa nykyisiä robottiratkaisuja, voivat ne integroituna huomattavasti parantaa niiden energiatehokkuutta [2]. Memristoreiden integrointi neuromorfisiin järjestelmiin voisi johtaa kompakteihin, vähätehoisiin ja tehokkaisiin keinotekoisii neuroverkkoihin, jotka pystyvät olemaan reaaliaikaisessa vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa [12]. Kaiken kaikkiaan memristorilla on ratkaiseva rooli robottijärjestelmien ominaisuuksien edistämässä tarjoamalla tehokkaita ja mukautuvia neuromorfisia laskentaratkaisuja [1, 3]. Niiden avulla robotit voivat käsitellä aistitietoa, navigoida monimutkaisissa ympäristöissä ja oppia kokemuksistaan, mikä tekee roboteista älykkäämpiä ja itsenäisempiä [1, 3]. Robotiikan kehityksen kannalta yhteistyö neuromorfisten ratkaisujen ja robotiikan tutkijoiden välillä on tärkeää myös tulevaisuudessa [3].

Viitteet

- [1] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh ja R. Suman, *Cognitive Robotics* **1**, 58 (2021).
- [2] S. Choi, J. Yang ja G. Wang, *Advanced Materials* **32**, 2004659 (2020).
- [3] Y. Yang, C. Bartolozzi, H. H. Zhang ja R. A. Nawrocki, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **126**, 106838 (2023).
- [4] K. Chin, T. Hellebrekers ja C. Majidi, *Advanced Intelligent Systems* **2**, 1900171 (2020).
- [5] D. Kim, S.-H. Kim, T. Kim, B. B. Kang, M. Lee, W. Park, S. Ku, D. Kim, J. Kwon, H. Lee, J. Bae, Y.-L. Park, K.-J. Cho ja S. Jo, *PLOS ONE* **16**, e0246102 (2021).
- [6] S. H. Jo, T. Chang, I. Ebong, B. B. Bhadviya, P. Mazumder ja W. Lu, *Nano Letters* **10**, 1297 (2010).
- [7] K. Sun, J. Chen ja X. Yan, *Advanced Functional Materials* **31**, 2006773 (2021).
- [8] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart ja R. S. Williams, *Nature* **453**, 80 (2008).
- [9] W. Huh, D. Lee ja C. Lee, *Advanced Materials* **32**, 2002092 (2020).
- [10] D. S. Jeong, K. M. Kim, S. Kim, B. J. Choi ja C. S. Hwang, *Advanced Electronic Materials* **2**, 1600090 (2016).
- [11] M. Hu, H. Li, Y. Chen, Q. Wu, G. S. Rose ja R. W. Linderman, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* **25**, 1864 (2014).
- [12] G. Indiveri, B. Linares-Barranco, R. Legenstein, G. Deligeorgis ja T. Prodromakis, *Nanotechnology* **24**, 384010 (2013).
- [13] X. Zhang, Y. Zhuo, Q. Luo, Z. Wu, R. Midya, Z. Wang, W. Song, R. Wang, N. K. Upadhyay, Y. Fang, F. Kiani, M. Rao, Y. Yang, Q. Xia, Q. Liu, M. Liu ja J. J. Yang, *Nature Communications* **11**, 51 (2020).
- [14] C. Bartolozzi ja G. Indiveri, *Neural Computation* **19**, 2581 (2007).
- [15] S.-O. Park, H. Jeong, J. Park, J. Bae ja S. Choi, *Nature Communications* **13**, 2888 (2022).
- [16] R. Wang, J.-Q. Yang, J.-Y. Mao, Z.-P. Wang, S. Wu, M. Zhou, T. Chen, Y. Zhou ja S.-T. Han, *Advanced Intelligent Systems* **2**, 2000055 (2020).
- [17] W. Huang, X. Xia, C. Zhu, P. Steichen, W. Quan, W. Mao, J. Yang, L. Chu ja X. Li, *Nano-Micro Letters* **13**, 85 (2021).

- [18] R. Islam, H. Li, P.-Y. Chen, W. Wan, H.-Y. Chen, B. Gao, H. Wu, S. Yu, K. Saraswat ja H.-S. Philip Wong, *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**, 113001 (2019).
- [19] G. Indiveri ja S.-C. Liu, *Proceedings of the IEEE* **103**, 1379 (2015).
- [20] I. Boybat, M. Le Gallo, S. R. Nandakumar, T. Moraitis, T. Parnell, T. Tuma, B. Rajendran, Y. Leblebici, A. Sebastian ja E. Eleftheriou, *Nature Communications* **9**, 2514 (2018).
- [21] Y. Van De Burgt, E. Lubberman, E. J. Fuller, S. T. Keene, G. C. Faria, S. Agarwal, M. J. Marinella, A. Alec Talin ja A. Salleo, *Nature Materials* **16**, 414 (2017).
- [22] S. Majumdar, H. Tan, Q. H. Qin ja S. Van Dijken, *Advanced Electronic Materials* **5**, 1800795 (2019).
- [23] R. Kreiser, A. Renner, V. R. C. Leite, B. Serhan, C. Bartolozzi, A. Glover ja Y. Sandamirskaya, *Frontiers in Neuroscience* **14**, 551 (2020).
- [24] S. Tijmons, G. C. H. E. De Croon, B. D. W. Remes, C. De Wagter ja M. Mulder, *IEEE Transactions on Robotics* **33**, 858 (2017).
- [25] R. A. John, N. Tiwari, M. I. B. Patdillah, M. R. Kulkarni, N. Tiwari, J. Basu, S. K. Bose, Ankit, C. J. Yu, A. Nirmal, S. K. Vishwanath, C. Bartolozzi, A. Basu ja N. Mathews, *Nature Communications* **11**, 4030 (2020).