

TEKOÄLY JA LASKEMISEN LAJIT

KARI LEPPÄLÄ

Tietokoneen mielikuvaan liittyy käsityksiä ihmisen ajattelusta, ja tekoälyn käsite liitettiin tietokoneisiin heti niiden synnystä lähtien. Mutta tekoälyn varhaisia muotoja on nähtävissä jo satoja vuosia ennen tietokoneen keksimistä. Ne ilmenivät erilaisten koneiden automaattisena ohjauksena. Erityisen merkittävä ja kauaskantoinen keksintö oli Joseph Jacquardin vuonna 1801 esittelemä reikäkorttien ohjaama kutomakone. Tekoälyn teoriaan taas liittyy se ehkä yllättävä kysymys, perustuuko ajattelemisen kokonaisluokuihin vai reaalityluokuihin? Nykyiset tietokoneet laskevat kokonaisluvuilla, mutta historiallisesti tarkastellen vastaus ei välttämättä ole lopullinen. Jos tavoittelemme laaja-alaista tekoälyä, joka pystyisi toimimaan ihmisten apuna ilman tapauskohtaista ohjelmointia, kysymystä pitää ehkä pohtia uudelleen.

Kokonaisluvuilla laskevat koneet syntyvät

Luvut ja numeroilla laskeminen olivat aikanaan valtavia oivalluksia. Laskemisen hyödyllisyys on niin ilmeistä, että se on peittänyt alleen karun tosiasian: me ihmiset olemme surkeita laskijoita! Tehotonta ja kömpelöä laskemista sormin, piirtomerkinöin, solmuin ja helmitauluun on harrastettu useita tuhansia vuosia. Vasta 1600-luvulla keksittiin mekaaniset laskukoneet. Laskukoneita olisi varmaankin osattu rakentaa käsityöläisten ja mekaanikkojen taidoilla jo paljon aikaisemmin. Mekaanisten laskukoneiden keksijät eivät kuitenkaan olleet mekaanikkoja vaan matemaatikkoja, kuten Blaise Pascal (1623–62) ja Gottfried Leibniz (1646–1716). Ilmeisesti vasta abstraktin matematiikan harrastaminen teki mahdolliseksi laskevien koneiden keksimisen.

Mekaaniset laskukoneet eivät synnyttäneet laskemisen tekniikan läpimurtoa. Ne olivat pitkään hankalia käyttää, sillä tärkeät kerto- ja jakolasku olivat niille paha haaste. Laskukoneet yleistyivät

vasta vähitellen. Kehittyvä talous ja tekniikka tarvitsivat paljon laskemista. Mekaaniset laskukoneet olivat käytössä 1970-luvulle saakka, kunnes elektroniset laskimet ja tietokoneet syrjäyttivät ne.

Laskukoneiden keksijöiden mielenkiinto kohdistui myös tieteelliseen laskentaan. Astronomia, geodesia ja navigointi edellyttivät tarkkaa laskemista, ja siinä ne turvautuvat valmiiksi laskettuihin trigonometrinen funktioiden ja logaritmien taulukoihin. Näiden taulukoiden tuottamiseen tarvittiin paljon työvoimaa. Jokainen uusi taulukon luku edellytti satoja yksinkertaisia, mekaanisesti toistuvia laskutoimituksia, ja taulukoihin jäi väistämättä virheitä. Vuonna 1822 brittiläinen matemaatikko Charles Babbage alkoi suunnitella erotuskonetta eli differenssikonetta. Se laskisi taulukoita sarjakehityksien avulla, jolloin hankalaa kerto- tai jakolaskua ei tarvittaisi. Babbage haaveili, kuinka hänen täysimittainen laskukoneensa toimisi höyryn voimalla. Hänen koneensa ei kuitenkaan koskaan valmistunut. Ruotsalainen keksijä Per Georg Scheutz onnistui rakentamaan ensimmäisen toimivan differenssikoneen vasta vuonna 1853. Ajatus matemaattisten taulukoiden tärkeydestä piti yllä kehitystyötä. Vieläpä ensimmäinen elektroninen laskin ENIAC (1945) suunniteltiin tuottamaan taulukoita.

Vasta ohjelmoitavien tietokoneiden myötä oivallettiin, ettei taulukoita edes tarvita. Tietokone voi laskea kulloinkin tarvittavan funktion arvon suoraan. Tietokoneet olivat kokonaisluvuilla laskemisen pitkän perinteen lopullinen vaihe. Tietokoneiden toimintaa alkoivat ohjata algoritmit, ja tietokoneiden käytöstä tuli algoritmien suunnittelu ja soveltamista.

Algoritmit yhdistävät logiikan ja laskemisen

Kokonaisluvuilla laskemisen kertomus näyttää sivuuttavan toisen merkittävän ajattelun tradition:

logiikan. Se on kulttuurihistoriallisesti ainakin yhtä vanhaa kuin laskutaito. Jo antiikin filosofit rinnastivat ajattelun logiikkaan, ja logiikan tutkimuksen perinne ulottuu aina meidän aikaamme asti. Logiikka ei kuitenkaan pystynyt täyttämään siihen kohdistuneita suuria lupauksia. Vaikka se on ajattelun tiede, se ei tarjoa vastauksia käytännön elämän ongelmiin. Logiikka nousi kuitenkin ainutlaatuisen kukoistukseen tietokoneiden aikakaudella. Nyt se ei enää ollutkaan inhimillisen ajattelun apuväline, vaan koneiden käyttämä kieli.

Logiikka on erottamaton osa tietokoneiden rakennetta ja toimintaa kahdella tavalla. Ensinnäkin laskutoimituksia suorittavat yksiköt on rakennettu loogisia operaatioita suorittavista virtapiireistä. Voitiin nimittäin osoittaa, että aritmetiikan perusoperaatiot voidaan muodostaa loogisista perustoiminnoista: sähkövirta kulkee tai se ei kulje. Oivalluksen taustalla on brittiläisen matemaatikon George Boolean (1815–64) työ. Hän kehitti logiikasta formaalin muodon, *Boolean algebran*. Logiikasta tuli nyt täsmällisesti määriteltyä. Boole oli mielestään keksinyt universaalit ”ajattelun lait”. Hänen keksintönsä ei kuitenkaan herättänyt suurempaa huomiota. Vasta vuonna 1932 informaatioteorian kehittäjänä paremmin tunnettu Claude Shannon (1916–2001) löysi oppinäytetyötä tehdessään lähes unohdetun Boolean algebran. Hän ehdotti, että sitä voitaisiin hyödyntää laskevien koneiden rakentamisessa.

Aivan yhtä merkittävä on loogisten toimintojen rooli algoritmeissa. Logiikka mahdollistaa ohjelman suorituksen muuttumisen olosuhteiden mukaan, esimerkiksi laskutoimitusten tulosten perusteella. Logiikasta tuli pian olennainen osa tietokoneiden ohjelmointia. Tämä muutti ihmisten mielikuvaa tietokoneista. Ne eivät enää olleetkaan vain laskukoneita, vaan päätelmiä tekeviä ja ajattelevia koneita. Myös tietokoneiden tutkijat joutuivat tämän mielikuvan pauloihin, ja ensimmäinen tieteellinen tekoälykonferenssi pidettiin jo vuonna 1957. Tietokoneajan pioneereja kiehtoivat voimakkaasti ihmisen älyn jäljittely tietokoneilla. Alan Turing ja John von Neumann pohtivat tekoälyä julkaisuissaan. Kumpikin heistä esitti myös kokonaislukuihin liittyviä varauksia. Vaikka aivoista tiedettiin vielä varsin vähän, näytti siltä, että aivojen toiminta ei perustu kokonaislukuihin vaan jatkuviin suureisiin.

Tämä ei kuitenkaan lannistanut tekoälyinnostusta. Epäily jäi kauneusvirheeksi tekoälyn suureen kertomukseen.

Reaaliluvuilla lasketaan toisin

Perusluonteeltaan reaaliluvut ovat täysin eri asia kuin absoluuttista määrää ilmaisevat kokonaisluvut. Reaaliluvut ilmentävät aina vertaamista johonkin, ne ovat suhteellisia. Reaalilukujen voi ajatella kuvaavan jatkuvia suureita, jotka esittävät maailmamme olennaisia ominaisuuksia, kuten pituuksia, tilavuuksia, painoja ja muotoja. Myös reaaliluvuilla laskemiseen liittyy oma kulttuurihistoriansa. Muinaisista ajoista alkaen ihminen on mitannut kulmia, muotoja ja etäisyyksiä. Eräs varhainen ja varsin hienostunut reaalilukuja käsittelevä laite on jo antiikissa tunnettu *astrolabi*, jota käytettiin kulmien mittaamiseen navigoinnissa ja tähtitieteessä. Astrolabissa on tähtäin ja siihen liitetty tasaväleihin jaettu asteikko kulmien mittaamiseksi. Asteikko on varustettu numeroilla, jotka sinänsä eivät merkitse mitään, ne ovat vain välineitä erilaisten kulmien vertaamisessa. Astrolabissa kulmia verrataan täyteen ympyrän kehään. Muinaisesta Babylonista periytyy se tuttu käytäntö, että täyden kehän asteluku on 360.

Toinen varhainen esimerkki reaalilukujen käytöstä on etäisyyden mittaaminen matkamittarilla eli *odometrillä* laskemalla mittauspyörän kierrokset. Vastaavasti suuren astian tilavuus voidaan tunnetusti mitata pienen mitta-astian avulla. Kummassakin tapauksessa tulos on kokonaisluku, joka antaa karkean likiarvon mitattavalle reaaliluvuille. Jos haluamme olla tarkempia, voimme käyttää kokonaisluvuista rakentuvia murtolukuja, mutta yleisesti ottaen reaaliluku voidaan esittää murtolukuna vain likimääräisesti.

Yhteiskunnan kehittyessä monimutkaisemmaksi laskemisen tarpeet lisääntyivät. Keksittiin uudenlaisia laskulaitteita reaalilukuja varten. Niitä sanotaan *analogisiksi laskimiksi*, koska niiden toiminta ei perustu laskemiseen vaan vertailuun. Tunnettu varhainen analoginen laskulaite on Galileo Galilein (1564–1642) tunnetuksi tekemä geometrisen harppi eli sektori. Sen avulla voitiin mitata kahden janan pituuksien suhde. Laite soveltuu hyvin piirustuksiin tehtäviin mittakaavan muunnoksiin. Harppia voitiin käyttää myös kanuunan korotus-

kulman määrittämiseen, siksi sitä sanottiin sotilas-tekniiseksi harpiksi. Galileo hankki pieneen palkkaansa lisätuloja valmistamalla ja myymällä näitä laitteita.

1600-luvun puolivälissä keksittiin logaritmiin perustuva laskutikku. Sen avulla hankalat kerto- ja jakolasku muuttuvat janojen yhteenlaskuksi ja vähennyslaskuksi. Kuten kaikki analogiset laskulaitteet, laskutikku toimii nopeasti. Tulos on valmis heti, kun laskettavat luvut on asetettu asteikoille. Toisaalta tarkkuus ei ole kovin hyvä, koska se riippuu laitteen valmistustarkkuudesta. Laskutikusta tuli tärkeä insinöörien työväline. Sellainen löytyi insinöörin rintataskusta aina 1970-luvulle asti.

Fysiikoilla ja insinööreillä on ongelmia, jotka edellyttävät paljon mutkikkaampaa laskemista kuin kerto- ja jakolasku. Dynaamisten järjestelmien toimintaa voidaan kuvata differentiaaliyhtälöillä, mutta valitettavasti monet differentiaaliyhtälöt ovat työläisiä ratkaista. Analoginen laskulaite voi ratkaista näitä yhtälöitä integroimalla. Voimme kuvata asiaa seuraavasti: kohteena on karttuvat suure, jonka karttumisnopeus riippuu yhden tai useamman muun suureen muuttumisesta. Toinen analogiselle laskimelle soveltuva ongelma on derivointi. Siinä ratkaisun arvo riippuu suuremman muuttumisnopeudesta: mitä nopeampi muutos on, sen suuremman arvon ratkaisu saa.

Differentiaaliyhtälöiden ratkaisemista varten brittiläiset James ja William Thomson kehittivät 1870-luvulla mekaanisen integraattorin, toiselta nimeltään differentiaalianalysointorin. Se muodostui sileistä teräspalloista, jotka oli asetettu vierimään pyörivää metallikiekkoa vasten. Vannevar Bush kehitti 1930–40-luvuilla Yhdysvalloissa saman idean pohjalta entistä tarkempia analogiakoneita. Pian analogiakoneiden mekaaniset osat korvattiin elektroniikalla. Tällaisen koneen keskeinen osa on elektroniputkista tai transistorista rakennettu operaatiovahvistin. Elektronisia analogiakoneita ohjelmoidaan kytkemällä vahvistimia ja muita komponentteja ongelman rakennetta jäljitteleväksi virtapiiriksi. Kun kone käynnistetään, se alkaa tuottaa välittömästi ongelman ratkaisua kuvaavaa signaalia. Ratkaisu voidaan tulostaa oskilloskoopilla tai piirturilla.

Elektroniset analogialaskimet olivat käytössä aina mikroprosessorien aikakaudelle asti, ja jossain

määrin niitä käytetään edelleen. Vaikka analogiakoneet eivät olleet tarkkoja, ne olivat nopeita, ja suoritivat hyvinkin hankalia laskutoimituksia. Yleiskäyttöisien analogiatietokoneiden ohella käytössä on ollut erikoistuneita laitteita: säätäjiä, pommitustähtäimiä, autopilotteja ja navigaattoreita. Jopa ensimmäisten miehitettyjen avaruusalusten ohjaus- ja navigointilaitteet olivat analogialaskimia. Reaaliluvuilla laskevien tietokoneiden perinne päättyi kuitenkin analogiakoneisiin. Jatkossa reaaliluvuilla laskeminen siirtyi digitaalisten tietokoneiden tehtäväksi. Ne tekevät sen analogiakoneita tarkemmin, mutta niiden kyvyissä on myös puutteita. Huomattavin puute on, että laskettava yhtälö tai niiden joukko täytyy ensin ratkaista, jotta se voidaan ohjelmoida tietokonetta varten.

Elävät olennot laskevat omalla tavallaan

Elävät olennot käsittelevät informaatiota, sillä ne saavat tietoa ympäristöstään ja muuttavat sen perusteella käyttäytymistään. Voisimme aivan hyvin sanoa sitä myös laskemiseksi, vaikka tällainen nimitys ei olekaan tavallinen. Ne eivät kuitenkaan harjoita laskemista tai logiikkaa siten kuin edellä on kuvattu. On olemassa ratkaisevasti erilainen ja hyvin perustavan laatuinen, kaikille eliöille ominainen informaation käsittelyn tapa. Yhdysvaltalaiset filosofi Daniel Dennett ja matemaatikko Michio Kaku ovat pohtineet elävien olentojen älykkyyttä laskemisen näkökulmasta ja luoneet siihen kiehtovan näkökulman.

Eliöiden tiedonkäsittelyä voidaan tarkastella esimerkkien kautta. Pohditaan aluksi hyvin yksinkertaisia alkueläimiä, joilla on kyky liikkua ja jotka osaavat myös hyödyntää liikkumistaan. Ne reagoivat kemiallisiin signaaleihin ja lämpöön, ja siksi ne osaavat välttää epämieluisia paikkoja. Ne osaavat myös haakeutua suotuisiin paikkoihin, joissa on ravintoa tai sopiva lämpötila. Eliöt, joilla on hermosto, ovat paljon monipuolisempia. Ne oppivat, sillä oppiminen on hermosolujen perustoiminto. Jo tutkijoiden rakastama 1 mm:n pituinen sukkulamato (*C. elegans*) pystyy oppimaan kokemuksistaan, vaikka sillä on vain 302 hermosolua. Näinkin yksinkertaiset eläimet alkavat muistaa mukavuuden ja epämieluisuuden alueita. Samalla niiden hermostoon alkaa kehittyä ympäristöön karttoja. Näin ne pystyvät liikkumaan ympäristönsään tarkoituksenmukaisesti.

Tällainen eläin reagoi muutoksiin passiivisesti, mutta seuraavien kehitysvaiheiden eläimille kehittyi myös aktiivisia piirteitä. Ne oppivat ennakoimaan ympäristön reaktioita ja sovittamaan toimintansa eri tilanteisiin. Ne alkavat tunnistaa lajitovereitaan, mikä on perustana kehittyneemmälle sosiaalisuudelle. On tärkeää erottaa lajitoverit muista eliölajeista, se mahdollistaa saalistamisen ja vaaran välttämisen. Kun ympärillä on toisia tunnistettuja eläimiä, niiden käyttökseen voi reagoida sen välittömän vaikutuksen mukaan, mutta myös sen mukaan, mitä eläin arvelee toisen eläimen aikovan tehdä. Kehittyneiden eläinten ja ihmisen kohdalla tällaista kykyä sanotaan ”mielen teoriaksi”.

Eliöiden laskemisessa on useita omaleimaisia piirteitä. Niiden hermostoon kehittyi ympäristöä kuvaavia malleja, jotka skaalautuvat yksinkertaisesta paikkatiedosta aina mutkikkaisiin ympäristöä jäljitteleviin simulaatioihin. Toinen piirre on ajallinen ulottuvuus. Hermostossa on tietoa menneisyydestä jatkuvasti karttuvana muistitietona. Ympäristöä kuvaavat aktiiviset mallit puolestaan ennakoivat tulevaisuuden tapahtumia. Siinä välissä on nykyhetki, jota edustaa eliön tunne itsestä. Maailma tuntuu eliöstä joltakin juuri nyt. Tässä suhteessa biologinen tiedonkäsittely poikkeaa periaatteellisella tasolla teknisestä laskennasta, sillä siihen näyttää sisältyvän myös laskennan merkitys eliölle. Tällaisia älykkään ja aktiivisen toiminnan piirteitä tavataan useimmilla eliöillä, joilla on hermosto: selkärangattomista aina ihmisiin saakka. Tietenkin toiminnan laajuus ja monimutkaisuus vaihtelevat valtavasti. Jopa kasvit ovat informaatiota käsitteleviä eliöitä. Niiden toimintojen aikaskaala on vain hyvin hidas, ja älykkyys ilmenee niissä lajin tasolla. Siksi emme miellä kasveja älykkäiksi.

Seuraako tekoälyä kybernetiikan aika?

Kybernetiikka on itsenäisesti toimivia ja itseohjautuvia järjestelmiä tutkiva tiede. Varhaiset kybernetikot, kuten Norbert Wiener (1894–1964), oivalsivat, että pitäisi tutkia myös eläviä olentoja ja soveltaa niistä opittuja asioita käytäntöön. Biologisten hermostojen toiminnan jäljittely teknisin keinoin on myös houkuttelevaa, sillä niiden tiedonkäsittelykyky on täysin ylivoimaista verrattuna

ihmisen luomiin koneisiin. Hermostoluet ovat tosin aivan liian hitaita toimiakseen algoritmien tapaan. Sen sijaan eliöt laskevat jäljittelemällä ympäristön ja eliön vuorovaikutusta suoraan, hermostoon rakentuneiden mallien avulla. Ne toimivat jatkuvien suureiden ohjaamina ja samalla tavoin kuin analogiakoneet.

Biologit eivät tunne hermoston toimintaa lainkaan yhtä tarkasti kuin insinöörit tuntevat omien koneidensa yksityiskohdat. Hermostoluet ovat nimittäin tavattoman pieniä ja tiheään pakattuja sekä niiden keskinäiset kytkennät ovat monimutkaisia. Se, mitä tiedämme hermoston suorituskyvystä, on saatu selville tutkimalla hermoston rakennetta ja havainnoimalla eliöiden käyttäytymistä. Hermostolujen aktiviteettia mitataan myös, mutta se onnistuu vain karkealla tasolla: voimme havainnoida lähes satunnaisesti valitun yksittäisen solun tai suuren solujoukon toimintaa. Tietomme on siis lähinnä epäsuoraa päättelyä. Mutta eri tutkijoiden havainnot ovat samansuuntaisia, ja uutta tietoa syntyy koko ajan.

Jostain syystä kybernetiikka mielletään usein historialliseksi tai jopa vanhentuneeksi tieteenksi. Tosiasiassa se on tärkeä systeemitieteen alue, joka tarjoaa tutkijoille valtavia teoreettisia haasteita. Tekoälyn yleistyessä saamme tottua myös sen itsenäisesti toimiviin ja itseohjautuviin soveluksiin. Tekoälyjen moottoreina toimivat ainakin toistaiseksi numeroilla laskevat ja digitaaliset tietokoneet. Voimme kuitenkin tutkia niiden toiminnan yleisiä lainalaisuuksia ja toimintaedellytyksiä havainnoimalla ja analysoimalla sekä biologisten systeemien että ihmisyhteisöjen toimintaa.

Kirjallisuutta

- Cariani, Peter. *Adaptivity and Emergence in Organisms and Devices*. *World Futures* 32: 111–132. 1990.
- Dennett, Daniel C. *Miten mieli toimii*. Porvoo, Helsinki: WSOY, 1997.
- Epp, Ellie. *The analog/digital distinction in the philosophy of mind*. Master's thesis, the Simon Fraser University, 1993.
- Kaku, Michio. *The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance and empower the mind*. London: Allen Lane, 2014.
- Mancuso, Stefano ja Viola, Alessandra. *Loistavat kasvit: mitä tiedämme kasveista ja niiden älykkyydestä?* Helsinki: Aula & Co., 2017.
- Pulkkinen, Jarmo. *Sudenluusta supertietokoneeseen. Laskemisen kulttuurihistoriaa*. Helsinki: Art House, 2004.
- Wiener, Norbert. *Ihmisestä, koneista, kielestä*. Porvoo, Helsinki: WSOY, 1969.

Kirjoittaja on tekniikan tohtori ja tietokirjailija.