

Algoritmeja koalitionmuodostuspeleille*

Helena Keinänen

VTM, FT

Toimijoiden kyky toimia ryhmänä on yhteisöjen perustavanlaatuisen ominaisuus. Yhteistointa onkin usein välttämätöntä, jotta suuret, erityistä osaamista tai resursseja vaativat tehtävät saataisiin suoritetuiksi. Yhteistointia vaatii ryhmän jäseniltä kykyä muodostaa ryhmä ja toimia yhdessä sovittaen yhteen yksilöiden tavoitteet ja preferenssit. Koalitionmuodostuspeleillä on pyritty mallintamaan tällaista yhteistointiminnallisuutta. Taloustieteen peliteorian alaan kuuluvissa koalitionmuodostuspeleissä tarkastellaan joukkoa pelaajia, jotka muodostavat ryhmiä eli koalitioita mahdollisten preferenssiensä mukaan.

Koalitionmuodostuspeleissä tarkastelun pääpaino on pelaajien muodostamassa ryhmässä yksittäisten pelaajien valintojen sijaan. Keskei-

senä ajatuksena on mallintaa ja tutkia älykkäistä ja usein itsekkäistä pelaajista koostuvan ryhmän toimintaa. Koalitionmuodostuspeleillä ovat olleet keskeisenä tutkimusalueena tekoälytutkimuksessa, jossa niitä on hyödynnetty autonomisten monitoimijajärjestelmien kehityksessä. Tärkeimpiin tutkimuskohteisiin koalitionmuodostuspeleissä kuuluvat optimaalisen koalitorakenteen löytäminen, erilaiset tavat jakaa koalitiosta saatu hyöty pelaajien kesken ja koalitorakenteiden tasapaino sekä tutkimustulosten soveltaminen kaupankäynti- ja neuvottelujärjestelmien kehittämiseen.

Väitöskirjassani tutkin erilaisia menetelmiä koalitionmuodostuspeleille. Tutkimus on keskittynyt optimaalisten tai tasapainossa olevien koalitorakenteiden löytämiseen erityisesti suuresta koalitorakenteiden joukosta. Tehokkaat hakumenetelmät ovat välttämättömiä tällaisten koalitorakenteiden löytämiseksi. Väitöskirja tuo lisätietoa koalitorakenteiden ominaisuuksista tietyille koalitionmuodostuspelien aliluokille, ja väitöskirjassa esitetään uusia menetelmiä löytää annetut kriteerit täyttävät koalitorakenteet. Tutkimustyön tulokset osoittavat,

* Kirjoitus esittelee Turun yliopistossa 17.6.2011 tarkastetun väitöskirjan ”Algorithms for Coalitional Games” aibepiirin ja keskeisimmät tulokset. Väitöskirjan esitarkastajina toimivat dosentti Ulrich Endriss (Amsterdamin yliopisto) ja tutkija Mitri Kitti (Aalto-yliopisto). Vastaväittäjänä toimi dosentti Ulrich Endriss ja kustoksena professori Hannu Salonen (Turun yliopisto). Väitöskirjan ohjaaja oli professori Hannu Salonen.

että etsittyjä koalitorakenteita on mahdollista löytää tehokkaasti käyttämällä joko stokastisia lokaaleja hakutekniikoita hyödyntäviä algoritmeja tai koalitorakenteiden erityisominaisuuksia hyödyntäviä hakualgoritmeja.

1. Koalitionmuodostuspelit

Kiinnostuksen kohdistaminen ryhmään toimijoita yksittäisen pelaajan sijaan ei ole peliteorian alalla uusi ajatus. Koalitionmuodostuspelejä käsiteltiin jo von Neumannin ja Morgensternin teoksessa 1940-luvulla (von Neumann ja Morgenstern 2004). Varsinainen kiinnostus koalitionmuodostuspeleihin liittyy kuitenkin tekoälytutkimuksen kehitykseen ja tutkimustulosten soveltamismahdollisuuksien valtavaan kasvuun viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana.

Peliteorian alalla koalitionmuodostuspelit ovat tarjonneet hyvän teoreettisen viitekehyksen tarkastella mekanismisuunnittelua, huutokauppaa tai sosiaalista valintaa vaihtoehtoisesta näkökulmasta. Toisaalta viimeaikainen internetin, sosiaalisen median ja sähköisen kaupankäynnin kehitys on tarjonnut koalitionmuodostuspeleille laajat sovellutusalueet. Teknologisen kehityksen ulottuminen sosiaaliseen elämään on nostanut relevanteiksi tutkimuskysymyksiksi virtuaalisen ryhmänmuodostumisen ja erilaiset voiton- tai kulunjakoon liittyvät tutkimusongelmat. Ei siis yllätä, että koalitionmuodostuspelejä on tarkasteltu perinteisen taloustieteen ulkopuolella alueella, jossa peliteoria ja tietojenkäsittelyteoria kohtaavat tekoälytutkimuksen.

Oletetaan, että meillä on joukko pelaajia, joiden tulee suorittaa tietyt tehtävät ja näiden tehtävien suorittaminen edellyttää pelaajilta yhteistyötä. Koalitionmuodostuspelissä pelaajat

jakautuvat ryhmiin eli koalitioihin. Kun jokainen pelaaja kuuluu täsmälleen yhteen koalitioon, jakoa kutsutaan koalitiostruktuuriksi. Koalitioon kuuluvien pelaajien yhteistoiminnasta aiheutuneen hyödyn jakamista voidaan koalitionmuodostuspeleissä tarkastella yksilön tai ryhmän kannalta.

Keskeisenä kysymyksenä koalitionmuodostuspeleissä on selvittää, minkälaisen koalitiostruktuurin annettu joukko pelaajia muodostaa. Yksi vastaus tähän kysymykseen on, että koalitiostruktuuri muodostuu niistä koalitioista, jotka ovat joko optimaalisia tai tasapainossa. Tällöin jatkokysymykseksi luonnollisesti nousee, miten tällaiset koalitiot generoidaan tai löydetään kaikkien mahdollisten erilaisten koalitioiden joukosta ja miten niistä muodostetaan koalitiostruktuuri.

Optimaalisen koalitiostruktuurin generoinnin problematiikka on saanut paljon huomiota tekoälytutkimusta käsittelevässä kirjallisuudessa. Yksi päätutkimuslinjoista on ollut kysymys siitä, miten maksimoida kaikkien koalitiostruktuurien tuottamaa yhteenlaskettua hyötyä, kun pelaajat suorittavat annetut tehtävät. Tällaisia kysymyksiä on usein pyritty lähestymään karakteristisen funktion pelien kautta. Karakteristisen funktion peli on yksinkertaisesti pari, joka koostuu kaikkien pelaajien joukosta ja jokaiselle koalitiolle arvon antavasta funktiosta. Koalitiostruktuurin arvo on kyseisen koalitiostruktuurin koalitioiden arvojen summa. Karakteristisen funktion pelissä ei oteta kantaa siihen, miten koalitioiden tuottama hyöty jaetaan pelaajien kesken.

Joskus koalition tuottama hyöty on selkeästi osoitettavissa kohdistuvaksi tietyille pelaajille eivätkä he voi siirtää hyötyä toisille. Esimerkkinä tällaisista koalitionmuodostuspeleistä ovat hedoniset pelit. Hedonisissa peleissä jokainen

pelaaja antaa joukon preferenssejä, jotka koskevat toimimista toisten pelaajien kanssa samassa koalitiiossa. Vaikka yleensä koalitionmuodostuspeleissä tarkastelun pääpaino on ryhmissä yksittäisten pelaajien sijaan, hedonisissa peleissä korostetaan yksittäisen pelaajan preferenssejä. Hedonisissa peleissä tarkastellaan pelaajan toimintaa omien preferenssiensä mukaan, olennaisena osana tasapainoista ryhmätoimintaa.

Hedoninen peli koostuu siis joukosta pelaajia ja näiden pelaajien preferensseistä. Hedonisessa pelissä pelaajien tavoitteena on maksimoida omaa hyötyään. Toisin sanottuna hedonisessa pelissä kukin pelaaja välittää vain omasta välittömästä hyödystään ja antaakin muita pelaajia koskevat preferenssit vain, jos he ovat samassa koalitiiossa kyseessä olevan pelaajan kanssa. Nämä preferenssit ilmaistaan yleensä joko koalitioiden listoina, järjestettynä pelaajan parhaana pitämästä koalitiosta huonoimpaan, tai matriiseina, joissa kukin pelaaja antaa numeerisen arvon sille, että olisi toisen pelaajan kanssa samassa koalitiiossa. Tärkeimmät hedonisiin peleihin liittyvät tutkimuskysymykset koskevat koalitiostruktuurien tasapainoa, jossa kukaan pelaajista ei hyödy koalition vaihtamisesta.

2. Algoritmit

Niin hedonisissa peleissä kuin karakteristisen funktion peleissäkin optimaalisen tai tasapainossa olevan koalitiostruktuurin löytäminen on laskennallisesti vaativa kombinatorinen tehtävä. Erilaisten koalitioiden ja koalitiostruktuurien määrä kasvaa eksponentiaalisesti pelaajien määrän kasvaessa. Niinpä erilaisten koalitiostruktuurien lukumäärä on usein jo pienillä pelaajamäärillä liian suuri, jotta kaikki koaliti-

struktuurit voitaisiin käydä läpi toivottujen koalitiostruktuurien löytämiseksi.

Tekoälytutkimusta käsittelevässä kirjallisuudessa on esitetty algoritmeja, jotka generoivat optimaalisen koalitiostruktuurin karakteristisen funktion peleissä (Sandholm ym.1999; Rahwan ym. 2009). Näiden lisäksi kirjallisuudessa on esitetty algoritmeja, jotka osoittavat tasapainossa olevat koalitiostruktuurit hedonisissa peleissä (Sung ja Dimitrov 2009; Bogomolnaia ja Jackson 2002; Ballester 2004).

Optimaalisen koalitiostruktuurin generoimiseen tarkoitettut algoritmit perustuvat yleensä hakutekniikoihin, joissa kaikkien koalitioiden joukosta muodostetaan koalitiostruktuuria, jolla olisi mahdollisimman suuri arvo. Teoriassa nämä tekniikat takaavat sen, että optimaalinen koalitiostruktuuri löytyy, mutta käytännössä ne usein vievät runsaasti tietokoneen muistia ja niiden ajoaika voi osoittautua hyvin pitkäksi.

Vaihtoehtona näille edellä kuvatuille algoritmeille voidaan kehittää hakualgoritmeja, jotka perustuvat stokastisille lokaaleille tekniikoille. Stokastiset lokaalit algoritmit ovat osoittautuneet tehokkaiksi menetelmiksi monien vaativien optimointiongelmiä ratkaisemiseen (Hoos 2005). Koalitionmuodostuspelien tapauksessa stokastiset lokaalit algoritmit hakevat sopivaa (optimaalista tai tasapainossa olevaa) koalitiostruktuuria käyttäen usein hakuavaruuteen kaikkien koalitiostruktuurien joukkoa. Liikkuessaan tässä hakuavaruudessa nämä algoritmit pyrkivät maksimoimaan kohdefunktion arvoa. Välttääkseen juuttumasta hakuavaruuden lokaaleihin huippuihin nämä heuristiikat voivat joskus ottaa satunnaisia askeleita, jotka huonontavat kohdefunktion arvoa. Hakuavaruuden rakenne on erittäin keskeinen stokastisten lokaalien algoritmien toiminnalle.

Usein stokastiset lokaalit algoritmit toimivat käytännössä tehokkaasti; niiden muistinkäyttö ja ajoajat ovat alhaisia. Stokastisten lokaalien menetelmien haittapuolena on, ettei niiden yleensä ole mahdollista osoittaa takaavan optimaalisen koalitiostruktuurin löytymistä haun aikana. Käytännössä on kuitenkin todettu, että stokastiset lokaalit algoritmit usein löytävät optimaalisen tuloksen hyvinkin nopeasti.

Yksi tapa lähestyä optimaalisen tai tasapainossa olevan koalitiostruktuurin generointi- ja hakuongelmaa on tarkastella uusia representaatiomahdollisuuksia koalitionmuodostuspeleille. Niin karakteristinen funktio kuin pelaajien preferenssit hedonisessa pelissä voidaan esittää joukkona sääntöjä. Tällaista lähtökohtaa on hyödynnetty vasta vähän. Yksi tapa on esittää hedoninen koalitionmuodostuspeli differenssilogiikan kaavajoukkona. Differenssilogiikka on lauselogiikkaa laajennettuna kattamaan muuttujien vertailun kokonaislukuihin (Niuwenhuis ja Oliveras 2005). Jos hedoninen peli esitetään joukkona tällaisia kaavoja, kaavajoukon toteuttavasta totuusarvojakelusta saadaan tasapainossa oleva koalitorakenne, jos annetussa pelissä on sellainen. Differenssilogiikkarepresentaation avulla voimme hyötyä viimeaikoina differenssilogiikalle kehitetyistä, käytännössä erittäin tehokkaista ratkaisimista ja selvittää niiden avulla koalitionmuodostuspeleiden kombinatorisista haasteista.

3. Lopuksi

Väitöskirjassa olen tarkastellut erilaisia menetelmiä löytää tai muodostaa optimaalinen tai tasapainossa oleva koalitiostruktuuri. Väitöskirjan ensimmäinen artikkeli keskittyy erityi-

sesti karakteristisen funktion peleihin. Toisessa ja kolmannessa artikkelissa tarkastellaan hedonisia pelejä hyödyntäen viimeaikoina kehitettyjä stokastisia lokaaleja hakuheuristiikkoja ja deterministisiä hakualgoritmeja. Viimeisessä artikkelissa tutkitaan differenssilogiikan tarjoamia representaatiomahdollisuuksia koalitionmuodostusongelmalle. □

Kirjallisuus

- Bogomolnaia, A. ja Jackson, M.O. (2002), "The Stability of Hedonic Coalition Structures", *Games and Economic Behavior* 38 (2), 201–230.
- Ballester C. (2004), "NP-Completeness in Hedonic Games", *Games and Economic Behavior* 49: 1–30. von Neumann, J. ja O. Morgenstern (2004), *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton.
- Niuwenhuis, R. ja Oliveras, A. (2005), "DPLL(T) with Exhaustive Theory Propagation and its Application to Difference Logic", teoksessa: Etesami, K. ja S.K. Rajamani (toim.), *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Aided Verification (CAV 2005)*, *Lecture Notes in Computer Science* 3576: 321–334.
- Rahwan, T., Ramchurn, S., Jennings, N. ja Giovannucci, A. (2009), "An Anytime Algorithm for Optimal Coalition Structure Generation", *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)* 34: 521–567.
- Sandholm, T., Larson, K., Andersson, M., Shehory, O. ja Tohmé, F. (1999), "Coalition Structure Generation with Worst Case Guarantees", *Artificial Intelligence* 111: 209–238.
- Sung, S. ja Dimitrov, D. (2009), "Computational Complexity in Additive Hedonic Games", *European Journal of Operational Research* 203: 635–639.