

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

MEMBRANINIŲ SKAIČIAVIMŲ IR DAIKTŲ INTERNETO TECHNOLOGIJOS

Aurimas GEDMINAS*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2019 m. kovo 12 d.; priimta 2019 m. kovo 13 d.

Santrauka. Daiktų internetas renka įvairius jutiklių duomenis, savarankiškai siūlo problemų sprendimus ir leidžia jų išvengti. Kad šios sistemos veiktų nenutrūkstamai, būtina taikyti intelektualiuosius informacijos valdymo ir skirstymo algoritmus. Siekiant atrasti naujus daiktų interneto informacijos skirstymo ir valdymo algoritmus, šiame straipsnyje apžvelgiami biotechnologiniai algoritmai ir jų taikymo privalumai bei trūkumai. Pristatomi membraniniai skaičiavimai, P sistema ir jos membraninė struktūra. Apžvelgiami komunikacijos tipai daiktų internete ir klasifikuojami informacijos skirstymo algoritmai, skirti daiktų interneto komunikacijai. Taip pat apžvelgiamas praktinis membraninių skaičiavimų taikymas ir galimybė taikyti membraninius skaičiavimus daiktų internete.

Reikšminiai žodžiai: daiktų internetas, membraniniai skaičiavimai, P sistema, gamtiniai skaičiavimai.

Įvadas

Ar daiktų internetui galime pritaikyti natūralioje gamtoje vykstančius procesus? Daiktų internetas (DI) – programinės ir techninės įrangos technologija, skirta išmaniaisiais įrankiais jungtis prie jutiklių ir daugybės prietaisų, siekiant juos valdyti arba gauti pagrindinę jų informaciją (Minerva, Biru ir Rotondi, 2015). Tai koncepcija, pagal kurią kiekvienas daiktas gali būti jungiamas prie interneto. Planuojama, kad 2020 m. prie interneto bus prijungta 50 milijardų daiktų (Davis, 2018). Daiktų internetas sujungia virtualų ir fizinį pasaulius, taip kurdamas išmaniąją aplinką. Per pastaruosius šešerius metus Europos Komisija aktyviai bendradarbiauja su pramonininkais, įvairiomis organizacijomis, trečiosiomis šalimis ir Europos Sąjungos valstybėmis narėmis, kad padidintų DI technologinį potencialą. Daiktų interneto technologija reikšmingai prisidėjo prie visuomenės, ekonomikos skaitmeninimo ir trečiosios pramonės revoliucijos, nes individai ir daiktai komunikacijos tinklais sujungiami ir praneša apie juos supančią aplinką ar būseną. Taigi DI taikymo sritis yra labai plati, o jo generuojamas duomenų kiekis per metus skaičiuojamas zetabaitais (Liton, 2018).

Savitvarkę daiktų internetą galima įvardyti kaip prietaisų komunikacijos užmezgimo procesą tinkle, kartu užtikrinant sklandų daiktų interneto veikimą (Bello ir Zeadal-

ly, 2016). Tai apima aplinkinių daiktų atpažinimą, vidutinę prieigos kontrolę, energijos valdymą ir paslaugų vadybos atkūrimą, daiktų interneto objektų savitvarkių komponentų integravimą, lokalias jungtis ir maršrutų sukūrimą. Vidutinė prieigos kontrolė užtikrina, kad joks kitas mazgas neužmęgs ryšio su kanalu tuo metu, kai jį naudoja tinklo mazgas. Šalia esančių prietaisų atpažinimo funkcija leidžia prietaisams atpažinti arčiausiai esančius prietaisus, kurie dėl savitvarkio proceso gali veikti ir sąveikauti.

Siekiant užtikrinti išmaniųjų daiktų ekosistemos darną ir saugumą, tikslinga pritaikyti evoliucijoje patikrintus veiklos procesus. Membraniniai skaičiavimai (MS) – tai kompiuterių mokslo sritis, kurioje skaičiavimo idėjos ir modeliai abstrahuojami iš gyvų ląstelių struktūros, funkcijų ir būdų, kuriais ląstelės jungiasi į audinius ar aukštesnės tvarkos struktūras (Paun, 2000). Trumpai tariant, membraniniai skaičiavimai pristato paskirstytuosius ir lygiagrečiuosius skaičiavimo modelius, naudojamus simbolių aibei lokalizuotai apdoroti. Evoliucijos taisyklės ir besivystantys objektai sujungti į segmentus, kuriuos vienas nuo kitų skiria membranos, o svarbiausias vaidmuo tenka tarp segmentų vykstančiai komunikacijai. Tai tik apytikslis membranų sistemos, kurią toliau vadinsime P sistema (Paun, 2000), aprašymas: jis yra bazinė, nes egzistuoja daugybė tokių mechanizmų rūšių. Esminė P sistemos sudedamoji dalis yra membranų struktūra, kur membra-

*Autorius susirašinėti. El. paštas aurimas.gedminas@vgtu.lt

nos gali būti išsidėsčiusios hierarchine tvarka kaip medis arba kaip membranų tinklas. Membranos idėja primena trimatę vezikulę iš biologijos, tačiau pati jos sąvoka yra apibendrinta. Membrana interpretuojama kaip dviejų sričių (Euklido erdvės): ribotos vidinės erdvės ir neribotos išorinės, skyriklis, sudarantis galimybę šioms dviem sritims selektyviai komunikuoti.

Iš biologijos pasisemtų idėjų įvairovė ir galimybės apibrėžti duomenų apdorojimo mechanizmų, sukurtų membranų pagrindu, architektūrą ir funkcijas yra praktiškai beribės (Ardelean ir Cavaliere, 2003), todėl jau ir dabar MS literatūra (Zhang, 2017) pateikia daugybę įvairių modelių. Taigi MS nėra su konkrečiu modeliu siejama teorija: ji veikiau yra struktūra, taikoma kategorizuotiems modeliams kurti. Sritis yra jauna, svarbiausias jos bruožas yra grindžiamas biologijos kontekstu ir taikomu matematiniu formalioju metodu. Šiuo metu pasiūlyta daug P sistemų tipų (Martin-Vide et al., 2003), tačiau P sistemų lankstumas ir įvairovė yra beribiai. Sparčiai daugėjant šios srities tyrimų, patvirtinama žinia, kad membraninių skaičiavimų neįmanoma pristatyti glaustai ir tiksliai. Vis dėlto yra daugybė idėjų, žymėjimo sistemų ir modelių, kurie jau tapo standartiniai, stabilūs ir laikytini kertiniais MS elementais (Paun, Rozenberg ir Salomaa, 2010).

Kertinis iššūkis – optimaliai parikti ir susieti P sistemą su daiktų interneto technologija. Tai leistų pasiūlyti pasaulyje analogų neturinčią realiojo laiko tiesioginės daiktų interneto generuojamos informacijos skirstymą.

Šiuo straipsniu siekiama atskleisti membraninių skaičiavimų vietą daiktų interneto informacijos skirstymo ir valdymo procese, todėl apžvelgiamos daiktų interneto ir membraninių skaičiavimų technologijos, jų taikymo sritys, privalumai ir trūkumai. Taip pat analizuojami daiktų interneto informacijos valdymo metodai ir pagrindiniai principai, pateikiamas galimas membraninių skaičiavimų įgyvendinimo daiktų internete būdas.

1. Membraninių skaičiavimų technologijos – P sistema

Jau ne kartą buvo įrodyta (Hunter, 1993), kad plačiau analizuojamus ir tyrinėjamus biologinius procesus galima tiksliai pritaikyti kompiuterių moksle. Biologija, tirdama gyvuosius organizmus, jų sandarą, rūšis, jų tarpusavio santykius ir sąveiką su aplinka, padeda suprasti supančią gyvąją aplinką ir tai, kaip galima ją pasitelkti šiuolaikiniams iššūkiams įveikti. Per daugybę milijardų metų gamta ir gyvybė išstobulino priemones ir procesus, kurie geba atsinaujinti ir prisitaikyti prie besikeičiančių sąlygų. O tai yra ir vienas pamatinių kompiuterių mokslo tikslų (Das ir Dai, 2007), todėl, kuriant daiktų interneto informacijos skirstymo ir valdymo algoritmus, tikslinga atsigręžti į biologinius procesus.

Membraniniai skaičiavimai – tai kompiuterių mokslo sritis, kurioje skaičiavimo idėjos ir modeliai abstrahuojami iš gyvų ląstelių struktūros, funkcijų ir būdų, kuriais ląstelės jungiasi į audinius ar aukštesnes struktūras. Membranų sistema, kurią toliau vadiname P sistema, nagrinėja

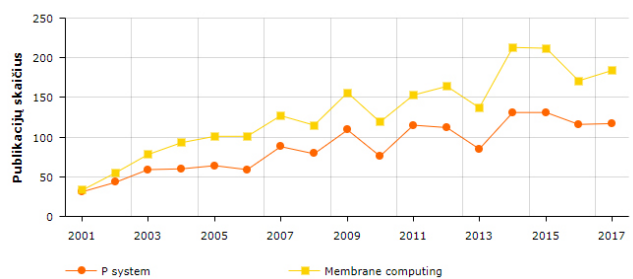
paskirstytuosius ir lygiagrečiuosius skaičiavimo modelius, naudojamus lokalizuotai apdoroti simbolių aibės (evoliucijos taisyklės ir besivystantys objektai sujungti į sritis, kurias vienas nuo kitų skiria membranos), o svarbiausias vaidmuo tenka tarp sričių vykstančiai komunikacijai.

Membraniniai skaičiavimai pirmą kartą pradėti tyrinėti 1998 m., o galutinė šio straipsnio versija buvo paskelbta kaip tyrimo ataskaita 2000 m. (Paun et al., 2010). Šiuo metu yra paskelbta per 2500 straipsnių, daugiau negu 100 disertacijų ir 50 knygų. Juose yra daug iškeltų ir neišspręstų problemų (Zhang et al., 2014), kurias tiria didelė grupė mokslininkų iš viso pasaulio.

Gamtiniai skaičiavimai – pastangos susisteminti kompiuterių mokslui naudingų idėjų, modelių ir paradigmų iš natūralios gamtos, o ypač iš gyvybės (Beale ir Jackson, 1990). Gamtoje vykstantys natūralūs procesai gali būti atkartoti kuriant naujus matematinius modelius. Klasikinė, biologijos įkvėpta gamtinių skaičiavimų šaka yra genetikos algoritmai ir dirbtinė gyvybė. Abi patvirtina, kad verta mokytis iš biologijos, ir grindžia optimistinę nuostatą, kad per daugybę milijardų metų gamta ir gyvybė išstobulino tam tikras priemones ir procesus, kurie, tinkamai pritaikyti kompiuterių mokslo reikmėms, galėtų būti stebėtinai naudingi ir įvairiai pritaikomi.

Gyvybė tiesiogiai susijusi su ląstelėmis. Ląstelė – mažiausias objektas, kurį visuotinai laikome gyvu. Ji labai maža, sudėtingos struktūros, atlieka sudėtingas funkcijas, jos viduje vyksta sudėtingi procesai, o išoriškai ji sąveikauja su šalia esančiomis ląstelėmis ir aplinka. Per milijardus evoliucijos metų ji išvystė būdą organizuoti ir valdyti biocheminius bei informacinius procesus.

Membranos leidžia medžiagoms judėti iš vieno skyriaus į kitą selektyviai (Ciobanu et al., 2005). Ši selekcija gali būti atliekama vien pagal dydį, kai juda mažos molekulės, arba ji gali vykti kur kas sudėtingiau – per baltymų kanalus, kurie molekulės ne vien atrenka, bet ir leidžia joms judėti iš žemos koncentracijos į didesnę koncentraciją, galbūt joms jungiantis, kai vyksta simportiniai ar antiportiniai procesai. Be to, ląstelių membranos neatskiria vien tų jungčių, kurių viduje vyksta tam tikros cheminės reakcijos: daugelis ląstelėje vykstančių reakcijų gali vykti pačių membranų viduje, o membranose esantys baltymai veikia kaip katalizatoriai.



1 paveikslas. Reikšminių žodžių „Membraniniai skaičiavimai“ ir „P sistema“ analizė *Web of Science* duomenų bazėje
Figure 1. Analysis of keywords “Membrane Computing” and “P System” in the Web of Science database

Esminė P sistemos sudedamoji dalis yra membranų struktūra, kur membranos gali būti išsidėsčiusios hierarchine tvarka (kaip ląstelėje, 2 paveikslas) arba išsidėsčiusios kaip medis (3 paveikslas).

Membranų struktūrą (2 paveikslas) sudaro rinkinys membranų, hierarchiškai išsidėsčiusių tam tikroje išorinėje membranoje, atitinkančioje plazmos membraną ir paprastai vadinamoje apvalkalo membrana. Apvalkalo membranos viduje gali būti keletas membranų – jos atitinka ląstelėje esančias membranas. Aplink branduolį esanti membrana, kurios viduje nėra kitų membranų, laikytina elementariąja membrana. Kiekviena membrana turi sritis, kurios yra viduje esančių membranų (jei jų yra), yra atskirta nuo kitų, esančių virš jos ir žemiau jos. Galime pastebėti, kad membrana ir sritis tiksliai atitinka viena kitą – štai kodėl kartais vartojame sukeičiamumo sąvoką.

Membranų hierarchinę struktūrą galima atvaizduoti įsiskaknijusiu medžiu – 3 paveiksle pateiktas medis, atitinkantis 1 paveiksle pateiktą membranų struktūrą. Medžio šaknys vaizduoja apvalkalo membraną, o lapai – elementariąsias membranas. Taip buvo sukurta daug grafinių teorinių idėjų, pavyzdžiui, medžio atstumai, membranų lygis, membranų struktūros aukštis / gylis, taip pat tokie terminai, kaip motininė / dukterinė membrana, įpėdinis ir pan. Iš medžio atvaizdo tiesiogiai kyla simbolinė membranų struktūros išraiška taikant skliaustų ir membranų

indeksų seką. 2 paveiksle pateikto medžio struktūrą atitinka 4 paveiksle pateikta seka.

$$[1[2]2[3[3[4[5]5[6[8]8[9]9]6[7]7]4]1.$$

4 paveikslas. Membranų struktūrą atitinkanti seka (Paun ir Rozenberg, 2002)

Figure 4. A representation of the same membrane structure (Paun & Rozenberg, 2002)

P sistema yra membranų struktūra su objektais membranose ir evoliucijos taisyklėmis, taikomomis objektams. Objektai evoliucionuoja pagal evoliucijos taisykles, kurios taip pat yra lokalizuotos ir susietos su membranų struktūros sritimis. Iš tiesų yra trys pagrindinių taisyklių tipai: 1) aibių taisyklės (dažniausiai vadinamomis evoliucijos taisyklėmis); 2) komunikacijos taisyklės; 3) membranų tvarkymo taisyklės. Šios taisyklės atitinka chemines reakcijas, kurios gali vykti ląstelėse, taigi jų forma yra $u \rightarrow v$, čia u ir v yra objektų aibės. Tačiau norėdami, kad sritys bendradarbiautų, turime priversti objektus judėti pro membranas, todėl prie objektų, atsiradusių pagal nurodytą taisyklę (objektų, atsiradusių iš rinkinio v), pridame tikslo funkcijas. Šios funkcijos yra čia, *vidun* ir *išorėn*, jos reiškia, kad su indikacija čia asocijuojamas objektas išlieka toje pačioje srityje, su indikacija *vidun* asocijuojamas objektas persikelia į gretimą žemesnę membraną, kuri nėra pasirenkama pagal konkrečius kriterijus, o *išorėn* reiškia, kad objektas turi palikti membraną, taigi tampa ją supančios aplinkos objektu.

P sistemos aprašas:

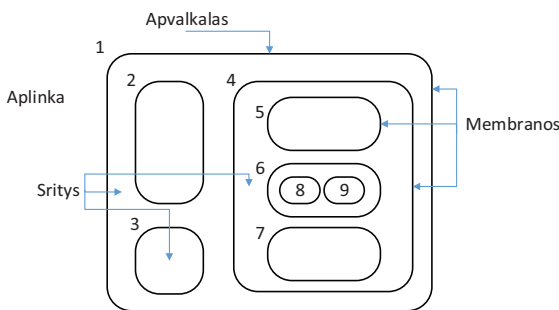
$$\Pi = (O, C, \mu, w_1, w_2, \dots, w_m, R_1, R_2, \dots, R_m, i_o), \quad (1)$$

čia O – (baigtinė ir netuščia) objektų abėcėlė; $C \subset O$ – katalizatorių rinkinys; μ – membranų struktūra, sudaryta iš membranų m ir žymimų $1, 2, \dots, m$; w_1, w_2, \dots, w_m – sekos, didesnės už O , žymingos membranų struktūros sričių $1, 2, \dots, m$ objektų aibes, R_1, R_2, \dots, R_m – membranų struktūros sričių $1, 2, \dots, m$ baigtiniai evoliucijos taisyklių rinkiniai; i_o – arba viena iš žymų $1, 2, \dots, m$, o atitinkama sritis yra sistemos rezultato sritis arba 0, skaičiavimo rezultatas gaunamas iš sistemos aplinkos.

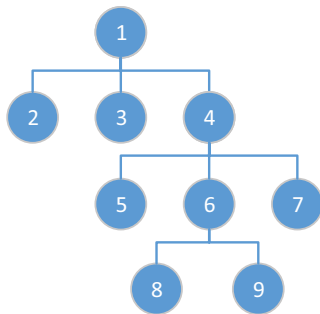
Apibendrinant pažymėtina, kad P sistemos konfigūraciją apibūdina membranų struktūra ir jos skyriuose esančių objektų aibė. Pradinė konfigūracija nurodoma apibūdinant membranų struktūrą tuo metu. Kai skaičiavimai pradami srityse esančių objektų sekomis, tai yra μ, w_1, \dots, w_m . Sistemai evoliucionuojant ir taikant taisykles, gali keistis ir objektų aibės, ir membranų struktūra (Paun, 2000).

2. Daiktų interneto informacijos skirstymas ir valdymas

Daiktų internetas (DI) – programinės ir techninės įrangos technologija, skirta išmaniaisiais įrankiais jungti prie jutiklių ir daugybės prietaisų, siekiant juos valdyti arba gauti pagrindinę jų informaciją (Minerva et al.,



2 paveikslas. Membranų struktūra (Paun ir Rozenberg, 2002)
Figure 2. A membrane structure (Paun & Rozenberg, 2002)



3 paveikslas. Membranų struktūrą atitinkantis grafas (Paun ir Rozenberg, 2002)

Figure 3. The tree describing the membrane structure from Figure 2 (Paun & Rozenberg, 2002)

2015). Šios technologijos turi bendrą tikslą – generuoti duomenis, naudojamus išmaniajai aplinkai kurti (Bello ir Zeadally, 2016). Vis dėlto šie tarpusavyje sąveikaujantys įrenginiai yra svarbiausieji DI ekosistemos komponentai. Panašiai kaip kad žmonės yra interneto vartotojai, įrenginiai (daiktai) yra DI vartotojai. Įrenginiai inicijuoja tarpusavio ryšius (Bello ir Zeadally, 2013). Kalbant apie baterijos veikimo laiką, apdorojimo galią ir atmintį, paprastai šie įrenginiai turi apribojimų ir jie dažnai veikia nepastovioje belaidėje aplinkoje, taigi susiduriama su daugybe tinklo problemų, kurių negalima išspręsti tradiciniais informacijos skirstymo protokolais (Nasser et al., 2017). Sensorinių tinklų pažanga paskatino atsiradimą įrenginių, kurie jaučia, skaičiuoja ir bendrauja vieni su kitais. Kai kurios technologijos, skirtos informacijai skirstyti ir valdyti, egzistuoja kelis dešimtmečius, tačiau skirtos daiktų interneto įrenginiams dar nėra tokios brandžios. Šios technologijos suteikia pamatus veikti DI sistemoms. Jungiamumui ir komunikacijai užtikrinti tam tikrų tipų tinklai geba sąveikauti vieni su kitais, kad bet kuriam DI ekosistemos įrenginiui būtų tiekiamas tolygus, visur esantis ir nenutrūkstamas ryšys.

Daugeliui DI įrenginių būtina jutiklių duomenis perduoti į centrinę stotį, kurioje jie būtų analizuojami ar saugomi. Duomenų perdavimas tarp įrenginių turi vykti naudojant veiksmingus protokolus. Veiksmingas komunikacijos protokolas privalo turėti veiksmingą duomenų perdavimą ir būti energetiškai efektyvus (Machado et al., 2013). Tačiau tipinei „įrenginys įrenginiui“ komunikacijai būdingos savybės kelia daug iššūkių DI ir tradiciniai informacijos skirstymo protokolai šių iššūkių nepajėgūs išspręsti.

3. Komunikacijos tipai daiktų internete

Daiktų internete egzistuoja įvairių tipų komunikacija: „įrenginys įrenginiui“ (D2D), įrenginio su paskirstyta saugykla, įrenginio su žmogumi (D2H) ir atvirkščiai. Komunikacija gali vykti tame pačiame tinkle ir tarp skirtingų tinklų. Svarbu paminėti, kad komunikacija gali vykti tiesiogiai su bazine stotimi arba per kitus įrenginius, jeigu nepavyksta tiesiogiai susisiekti su bazine stotimi. Taip pat tarpiniu komunikacijos lygmeniu gali būti reikalingas žmogaus įsikišimas, siekiant priimti sprendimą. Be žmogaus įsikišimo įrenginiai gali komunikuoti, kai reikia perduoti informaciją žmogui arba ją gauti tiesiogiai iš žmogaus sprendimams priimti. Įrenginiai gali bendrauti su duomenų saugykla, kai reikia perduoti užfiksuotus duomenis, atnaujinti saugomus duomenis arba nuskaityti saugomus duomenis tam, kad dirbtinis intelektas galėtų priimti sprendimus.

Remiantis De Poorter, Moerman ir Demeester (2011), svarbiausias DI keliamas reikalavimas – nenutrūkstamas ryšys su bazine stotimi. Taigi labai svarbu užtikrinti D2D komunikaciją. Įrenginiai, kurie vadinami išmaniaisiais daiktais, gali būti nedideli jutikliai, pasyvios arba aktyvios RFID žymos, kurios užfiksuoja fizinius duomenis ir

gali savarankiškai atlikti užduotis ar priimti sprendimus. Įrenginys gali būti ir mobilusis prietaisas, pvz., išmanusis telefonas. Tam tikrais atvejais vietoj įrenginių, kurie keičiasi informacija, gali būti naudojamos skirtingos ryšių technologijos (De Poorter et al., 2011), kurios bendravimo procesui kelia iššūkių. Dauguma šių technologijų naudoja patentuotus protokolus, iš kurių kiekviena skirtingai įgyvendinta fiziniu, duomenų perdavimo ir tinklo lygmeniu. Taigi norint, kad DI veiktų nenutrūkstamai, komunikacijos procesas turi palaikyti informacijos skirstymą ir valdymą tarp skirtingų įrenginių ir skirtinguose tinkluose.

4. Informacijos skirstymo algoritmų, skirtų daiktų interneto komunikacijai, klasifikavimas

Daugelyje DI taikymo sričių būtina perduoti įrenginių ar jų grupės jutiklių duomenis į centrinę stotį, kur jie būtų analizuojami ar saugomi. Duomenų perdavimas tarp įrenginių turėtų vykti naudojant veiksmingus protokolus. Veiksmingas komunikacijos protokolas turėtų palaikyti veiksmingą duomenų perdavimą ir efektyvą energijos vartojimą. Tačiau tipinei D2D komunikacijai būdingos savybės kelia daug iššūkių DI ir tradiciniai skirstymo protokolai šių iššūkių nepajėgūs išspręsti. Išskiriamos šios D2D komunikacijos savybės:

- *Įrenginių heterogeniškumas*: įrenginiai yra įvairūs, todėl skirtingai veikia ir skirtingai pritaikomi.
- *Įrenginių bendradarbiavimas*: vienu metu šalia egzistuoja daugybė įvairių įrenginių, kurie gali jungtis vieni su kitais ir bet kuriuo metu komunikuoti bei bendradarbiauti.
- *Skirtingi tinklai ir tinklų standartai*: veikdami prietaisai naudos skirtingas tiekėjams specifines tinklo ar komunikacijos technologijas.
- *Įrenginių ribotumai*: baterijos veikimo laikas, atmintis, apdorojimo galia ir pan.
- *Savarankiška konfigūracija, organizavimasis ir autonomiškumas*: dauguma D2D tinklų patys konfigūruojasi, organizuojasi ir yra autonomiškai. Todėl įrenginiai patys valdys trukdžius, skirtingų protokolų vertimo procesą ir komunikaciją.
- *Nenuspėjamas prietaisų judėjimas*: DI sudaro mobilieji arba stacionarūs įrenginiai. Judėdami mobilieji įrenginiai gali atsijungti nuo tinklo, taigi gali atsirasti ryšio pertrūkių, todėl D2D tinkluose tinklo topologijos pokyčių neįmanoma prognozuoti.

Dėl išvardytų charakteristikų išmaniajai D2D komunikacijai DI būtina išrasti naujus metodus. Be to, DI gali veikti daug įrenginių, todėl įrenginių perduodamų duomenų gausa gali turėti įtakos D2D tinklų patikimumui ir komunikacijos greičiui. Galima teigti, kad, didinant tinklo pajėgumą, padidėjusio duomenų perdavimo intensyvumo problema bus išspręsta. Tačiau dėl tokio sprendimo gali padidėti veiklos sąnaudos, be to, jis nėra pritaikomas prie poreikių. Tikrąjį sprendimą galima rasti per tinklų kūrimo procesą, nustatant informacijos skirstymo ir valdymo maršrutus (Liotta, 2013). Siekiant atskleisti visą DI funk-

cionalumą, D2D ryšiai reikia intelektualių, veiksmingų ir kintamo dydžio maršruto nustatymo protokolų ar algoritmų, kurie galėtų prisitaikyti prie skirtingų tinklo dydžių scenarijų ir variantų bei būtų pajėgūs rasti optimalius maršrutus. Šie protokolai gali užtikrinti sklandžią D2D komunikaciją sudėtingoje ir nevienalytėje interaktyviosios terpės aplinkoje. Pavyzdžiui, pagal pastatų automatizavimo scenarijų kartu egzistuoja ir ribotų išteklių įmontuoti ir didelės galios valdiklių įrenginiai, todėl išmanusis protokolai privalo užtikrinti ryšį tarp šių skirtingų įrenginių taip, kad prietaisų asimetrija būtų nepastebima ir netrikdytų D2D komunikacijos. Toliau pateikiama DI maršruto parinkimo algoritmų ir protokolų klasifikacija ir jų savybės.

4.1. Stochastiniai / tikimybių algoritmai

Šie algoritmai skirti maršruto parinkimui optimizuoti. Jie sukurti siekiant nustatyti informacijos skirstymo maršruto tikimybes ir optimizuotų tinklo išteklius: energijos suvartojimą, ryšio parametrus (pvz., signalo ir triukšmo santykį, klaidų lygį) ir pan. Remiantis tinklo sąlygomis, šie tinklo ištekliai yra pasirinkti ir apibrėžti kaip optimalumo kriterijai. Bet koks pasirinktas maršrutas yra tas, kuris maksimaliai pagerina šiuos kriterijus.

Du pagrindiniai metodai, kuriuos šie algoritmai naudoja optimizavimui, yra optimizavimas realiuoju laiku ir išankstinis optimizavimas (Lott ir Teneketzius, 2006). Taikant optimizavimo realiuoju laiku metodą, informacija apie dominančius kriterijus atskleidžiama tuo metu, kai duomenys perduodami iš vieno įrenginio į kitą, taigi maršrutai kuriami dinamiškai, remiantis turima informacija. Šiam metodui reikia skirti daug energijos ir skaičiavimo išteklių. Išankstinio optimizavimo atveju sprendimas priimamas iš anksto, jis konstruojamas remiantis tikėtinumo kriterijais, taigi kuriami maršrutai gali būti neoptimalūs. Taigi stochastiniai maršruto parinkimo algoritmai yra tinkamesni, kai būtina palaikyti nenuspėjamą mobiliųjų prietaisų judėjimą DI vykstančioje D2D komunikacijoje.

4.2. Hierarchiniai algoritmai

Hierarchiniai algoritmai gali būti grindžiami medžiu arba klasteriu.

- *Medžiu grindžiami algoritmai.* Įrenginiai, kurie veikia medžiu grindžiamais algoritmais, duomenis į bazinę stotį perduoda per kitus įrenginius, esančius tame pačiame tinkle. Daugelio šuolių medis konstruojamas duomenų maršrutui nustatyti. Ši funkcija riboja bendrą jų naudojimą DI, nes tarp įrenginių egzistuoja skirtingi komunikacijos būdai. Pavyzdžiui, D2D tinkle komunikacija gali vykti tarp pavienių įrenginių, kurie gali komunikuoti su daugeliu, daugelis įrenginių gali komunikuoti su vienu arba daugelis su daugeliu (Machado et al., 2013).
- *Klasteriu grindžiami algoritmai.* Klasteriu grindžiami algoritmai klasifikuoja įrenginius į hierarchines grupes / klasterius. Pagal savo vietą hierarchijoje

įrenginiai atlieka skirtingus vaidmenis. Aukštesnę vietą hierarchijoje turintis tam tikros grupės įrenginys yra klasterio arba grupės vadovas (angl. *cluster head*, CH). Paprastai CH yra atsakingas už klasteryje surinktos informacijos perdavimą kitam klasteriui arba į bazinę stotį / saugojimo įrenginį. CH parinkimas yra svarbiausias šio tipo algoritmų uždavinys. Yra daugybė algoritmų, remiantis kuriais literatūroje siūloma išrinkti CH, bet šie algoritmai turi įtakos duomenų perdavimo spartai (Machado et al., 2013).

4.3. Kontekstą vertinantys algoritmai

Kontekstas – tai bet kokia informacija, kuri gali būti naudojama objekto (žmonių ar daiktų) būklei apibūdinti (Abowd et al., 1999). Prietaisų atveju kontekstas paaiškina vidinę ar išorinę jų būseną ir gali būti išgaunamas iš įrenginio, jo aplinkos ar gautų pranešimų turinio. Įrenginio kontekstas gali būti jo akumulatoriaus būklė, judėjimo greitis, apdorojimo galia, vietos arba atminties / saugyklos dydis ir statusas. Iš gautų pranešimų gautas kontekstas apima pranešimo šaltinį, pranešimo paskirties vietą, prioriteto lygį ir pristatymo terminą (Musolesi ir Mascolo, 2006). Aplinkos kontekstas apima atstumą tarp įrenginių, trukdžių lygius arba paketų praradimo greitį bei tinklo topologiją.

Kontekstas gali būti naudojamas teikiant maršruto paslaugą įrenginiui, kai įrenginio užduotis – perduoti duomenis. Taigi kontekstas išmanijai D2D komunikacijai yra naudingas priimant sprendimus apie maršrutą (Abowd et al., 1999). D2D komunikacijoje kontekstą vertinantys maršruto parinkimo algoritmai gauna reikiamą informaciją (kontekstą) apie situaciją aplink tinkle esančius įrenginius ir, remdamiesi gauta informacija, parenka maršrutus, kuriais ji perduodama. Kontekstą vertinantys algoritmai gali reaguoti į besikeičiantį įrenginio kontekstą ir keisti jo maršruto parinkimo parametrus realiuoju laiku, kaip to reikalauja tinklas.

4.4. Biotechnologiniai algoritmai

Šios klasės algoritmai sprendžia dažnas ir reikšmingas problemas didelio masto tinklams, kuriems būdinga sudėtinga ir heterogeniška architektūra, dinaminė organizavimosi prigimtis, riboti ištekliai ir centralizuotų valdymo bei infrastruktūros nebuvimas (Dressler ir Akan, 2010). Biotechnologiniai algoritmai imituoja biologinių sistemų valdymo dėsnius ir jų dinamiką. Biotechnologiniai algoritmų pavyzdžiai – spiečiaus logika grindžiami algoritmai, pvz., skruzdžių kolonijos optimizavimo (angl. *the ant colony optimization*, ACO) algoritmas. Spiečiaus logika grindžiama decentralizuotų ir savarankiškų organizacijų, pvz., skruzdžių kolonijų, žuvų pulkų, bičių spiečių ar paukščių būrių, kolektyvinio elgesio stebėjimu (Di Caro, Ducatelle ir Gambardella, 2005). Pagrindiniai ACO maršrutizavimo algoritmų veikimo principai (Dressler ir Akan, 2010; Farooq ir Di Caro, 2008) yra šie:

1. *Maisto paieškos*: tai skruzdėlių naudojamas procesas, kai norima atrasti trumpiausią kelią nuo lizdo iki maisto šaltinio. Jis vyksta kolonijų lygmeniu – skruzdės kartu dalyvauja kelio mokymosi ir atradimo procesuose, siekdamos atrasti trumpiausią kelią, jungiantį jas su maisto šaltiniu.
2. *Stigmergija*. Tai procesas, kai skruzdės lokaliai keičia atrastus takus ir reaguoja į šias modifikacijas – taip kuriamas tam tikras visuotinis koordinavimas. Tai paskirstytojo mokymosi ir valdymo forma, grindžiama netiesiogine skruzdžių sąveika ir bendradarbiavimu. Stigmerginis koordinavimas yra pagrindinis būdas užtikrinti sistemai būdingą elgseną. Remdamiesi stigmerginiu procesu, ACO metodai užtikrina veiksmingą maršrutą dideliuose tinkluose (Pablo López-Matencio ir Costa-Montenegro, 2017).

Taigi šių gamtoje vykšančiais procesais grįstų algoritmų privalumai DI informacijos skirstymo ir valdymo algoritmuose yra šie:

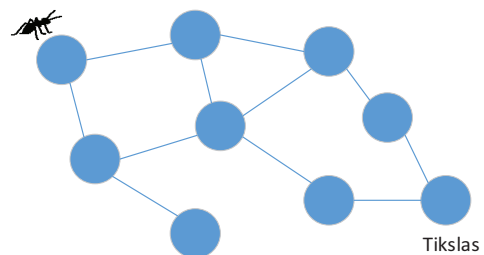
1. Jie pajėgūs susidoroti su DI veikiančių įrenginių galimybių ir technologijų heterogeniškumu ir asimetrija: skruzdžių kolonijas sudaro pavienės skruzdės, besiskiriančios savo pajėgumais ir gebėjimais, tačiau, nepaisant šio būdingo heterogeniškumo, skruzdžių kolonijos pasitelkia kolektyvinį intelektą, kad optimizuotų kelio pasirinkimą (Klugl, 2001).
2. Jie gali palaikyti savarankišką organizavimąsi, savarankišką konfigūravimąsi ir bendradarbiavimą, nes tai palengvina autonomiškos, nuo infrastruktūros nepriklausomos D2D komunikacijos įdiegimą DI aplinkoje (Atakan ir Akan, 2007): stigmerginis procesas leidžia skruzdžių kolonijoms bendradarbiauti ir organizuotis savarankiškai, be centrinio koordinavimo.
3. Gamtos įkvėpti algoritmai gali dinamiškai prisitaikyti, kad užtikrintų įrenginių komunikaciją: daiktų interneto D2D tinklas yra dinamiškas, įrenginių mobilumas jame yra nenuspėjamas, taigi informacijos skirstymo algoritmai gali veikti pagal maisto paieškų modelį. Maisto paieška leidžia skruzdžių kolonijai veiksmingai prisitaikyti prie kintančių aplinkybių, kad išgyventų.
4. Prisitaikomumas prie kintančių aplinkos sąlygų: naujomis sąlygomis biologinės sistemos gali lengvai mokytis ir vystytis. Taigi ir gamtos įkvėpti algoritmai gali padėti įrenginiams spręsti neprognozuojamumo problemą, kuri gali kilti daiktų internete dėl aplinkinių prietaisų, dalyvaujančių D2D komunikacijoje.
5. Tvirtumas ir atsparumas: jie tvirti ir atsparūs gedimams, atsirandantiems dėl vidinių arba išorinių veiksnių. Taigi jie gali atlaikyti sudėtingas aplinkos sąlygas.
6. Efektyvus ribotų išteklių valdymas: maisto paieškų procesas skruzdžių kolonijose įkvepia daugybę efektyviai naudojamų tinklo kūrimo procesų.

Apibendrinant galima teigti, kad nors kiekvienos klasės algoritmai yra pritaikomi, vis dėlto išmaniajai D2D komunikacijai DI labiausiai tinka biotechnologiniai algoritmai. Jie palaiko išmaniosios D2D komunikacijos charakteristikas, geba atsistatinti pasinaudoti tinklo ištekliams realiuoju laiku, užtikrindami sklandžią komunikaciją.

5. Membraniniai skaičiavimai daiktų interneto informacijai skirstyti ir valdyti

Spiečiaus intelektas yra sritis, kurioje daugiausia dėmesio skiriama kolektyviniam intelektui, kurį sudaro didelės grupės mažiau protingų agentų. Šių agentų, tokių kaip skruzdės, paukščiai, bakterijos, žuvis ir bitės, kolektyvinis intelektas pasiekiamas per jų sąveiką ir bendradarbiavimą. Šie agentai sąveikauja natūraliai, norėdami patenkinti pagrindinį maisto poreikį ir poreikį persikelti: skruzdės – feromoniais, bitės – šokdamos, o bakterijos – chemiais gradientais. Spiečiaus intelektas buvo tiriamas pasitelkus skruzdėlių kolonijos optimizavimą, dalelių virpėjimo optimizavimą, bičių algoritmus ir bakterijų paruošimo optimizavimą. Skruzdėlių kolonijos optimizavimas (Gao et al., 2016) – tai tikimybinis algoritmas, pagrįstas maisto ieškančių skruzdėlių elgesiu, tyrimas ir šių algoritmų įgyvendinimu paieškos ir optimizavimo srityje. Skruzdės paskleidžia feromonus kelyje, kuriuo jos keliauja iš kolonijos link maisto šaltinio (5 paveikslas). Feromonus jos skleidžia tiek keliaudamos pirmyn, tiek atgal. Aplinkoje feromonai suyra. Kiekviename kelių susikirtime yra tikimybė pasirinkti vieną iš kelių. Tuo atveju, kai visi tikėtini maršrutai yra nauji ir nė viename tų maršrutų feromonų nėra paskleista, vieno ar kito maršruto pasirinkimo tikimybė yra lygi. Kadangi skruzdės juda pirmyn ir atgal, priklausomai nuo kelionės dažnumo, feromonų sąnašų kiekis trumpesniame kelyje išauga.

Pritaikę šį algoritmą išspręsimė daiktų interneto informacijos skirstymo problemą (Al-Fuqaha et al., 2015). Optimalaus kelio tarp skirtingų dinaminių siuntėjų ir imtuvų per dinaminius ryšio kanalus radimas yra daiktų interneto informacijos skirstymo problemų sprendimo būdas. Interneto daikto maršruto problema gali būti matematiškai modeliuota grafu $G = (V, A)$, čia $V = \{0, 1, \dots, n\}$, yra mazgų, atstovaujančių serveriui (0) ir siuntėjams $\{1, \dots, n\}$, rinkinys, o $A = \{(i, j) | i, j\}$ yra kelio rinkinys, kai kiekvienas



5 paveikslas. Skruzdėlių kolonijos algoritmas optimaliam keliui rasti

Figure 5. An ant colony optimization based algorithm designed to find the shortest path in a graph

turi minimalų laiką t_{ij} , reikalingą duomenims perduoti iš i mazgo į j mazgą. Paslaugų kokybė (QoS) q_i , kurios reikalauja kiekvienas siuntėjas i ($i > 0$), laikoma medžio viršūne Q_1, Q_2, \dots, Q_v , ji nurodo srauto pajėgumus ir yra susijusi su kiekvieno paketo pradžios tašku (viršūnė 0), o tai reiškia pirmąją siuntėjo padėtį. Dėl dinaminio siuntėjo pozicijos kitimo viršūnė 0 gali būti pakeista iš vieno mazgo į kitą daiktų interneto aplinkoje. Problemos sprendimo tikslas – rasti geriausią kelią, tenkinantį keturis skirtingus parametrus: delsa, energijos suvartojimas, paketų praradimai ir pralaidumas. Kadangi daiktų internetas susideda iš nevienalyčių sistemų, šis tikslas turėtų būti pasiektas kiekvienam tinklo tipui, įskaitant ir iš dalies sutampančias sritis. Paslaugų kokybės verčių suma, reikalinga skirtingų siuntėjų duomenims perduoti per i sąsają, neturi viršyti Q_i . Manoma, kad kiekviena ryšio būseną gali būti pakeista perduodant.

Išvados

Daiktų interneto informacijos valdymas ir skirstymas yra svarbus uždavinys siekiant, kad sistemos veiktų nenutrūkstamai ir darniai.

Kurti savitvarkius daiktų interneto valdymo protokolus, geriausia remtis biotechnologiniais algoritmais, nes gamta ir gyvybė išstobulino priemones bei procesus, kurie geba atsinaujinti ir prisitaikyti prie besikeičiančių sąlygų.

Membraninių skaičiavimų taikymo galimybės daiktų internete nėra tirtos, nors susidomėjimas daiktų internetu ir membraniniais skaičiavimais kasmet auga.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju VGTU Elektronikos fakulteto Elektroninių sistemų katedros vedėjui prof. dr. Daliui Navakauskui už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

- Abowd, G. D., et al. (1999). *Towards a better understanding of context and context-awareness*. In H.-W. Gellersen, *Handheld and ubiquitous computing*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (pp. 304-307). ISBN 978-3-540-48157-7. https://doi.org/10.1007/3-540-48157-5_29
- Al-Fuqaha, A. I., et al. (2015). Internet of things, a survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 17(4), 2347-2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Ardelean, I. I., & Cavaliere, M. (2003). Modelling biological processes by using a probabilistic P system software. *Natural Computing*, 2(2), 173-197. ISSN 1572-9796. <https://doi.org/10.1023/A:1024943605864>
- Atakan, B., & Akan, O. B. (2007). Biologically-inspired spectrum sharing in cognitive radio networks. In *2007 IEEE Wireless Communications & Networking Conference*, 1-9, 43-48. ISSN 1525-3511. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2007.14>
- Beale, R., & Jackson, T. (1990). *Neural computing – an introduction*. Institute of Physics Publishing (240 p.). ISBN 0852742622. <https://doi.org/10.1887/0852742622>
- Bello, O., & Zeadally, S. (2013). Communication Issues in the Internet of Things (IoT). *Next-Generation Wireless Technologies, 4G and Beyond*. London, Springer London (pp. 189-219). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5164-7_10
- Bello, O., & Zeadally, S. (2016). Intelligent device-to-device communication in the internet of things. *IEEE Systems Journal*, 10(3), 1172-1182. ISSN 1932-8184. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2298837>
- Ciobanu, G., et al. (2005). *Applications of membrane computing (Natural Computing Series)*. Springer-Verlag. ISBN 978-3-540-29937-0. <https://doi.org/10.1007/3-540-29937-8>
- Das, M. K., & Dai, H. K. (2007). A survey of DNA motif finding algorithms. *Bmc Bioinformatics*, 8, 13. ISSN 1471-2105. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-8-S7-S21>
- Davis, G. (2018). 2020: Life with 50 billion connected devices. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326056>
- De Poorter, E., Moerman, I., & Demeester, P. (2011). Enabling direct connectivity between heterogeneous objects in the internet of things through a network-service-oriented architecture. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(1), 61. ISSN 1687-1499. <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2011-61>
- Di Caro, G., Ducatelle, F., & Gambardella, L. M. (2005). AntHocNet, an adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. *European Transactions on Telecommunications*, 16(5), 443-455. <https://doi.org/10.1002/ett.1062>
- Dressler, F., & Akan, O. B. (2010). A survey on bio-inspired networking. *Computer Networks*, 54(6), 881-900. ISSN 1389-1286. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2009.10.024>
- Farooq, M., & Di Caro, G. A. (2008). *Routing protocols for next-generation networks inspired by collective behaviors of insect societies (An overview)*. Swarm Intelligence, Introduction and Applications. C. Blum & D. Merkle. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg (pp. 101-160). https://doi.org/10.1007/978-3-540-74089-6_4
- Gao, S. C., et al. (2016). Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem, *Applied Mathematics and Computation*, 285, 149-173. ISSN 0096-3003. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.03.035>
- Hunter, L. (1993). *Molecular biology for computer scientists*. Artificial intelligence and molecular biology. H. Lawrence, American Association for Artificial Intelligence (pp. 1-46).
- Klugl, F. (2001). Swarm intelligence, from natural to artificial systems. *Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(1), U153-U156. ISSN 1460-7425.
- Liotta, A. (2013). *Why the internet needs cognitive protocols*. New York, NY, USA, IEEE Spectrum. Retrieved from <https://spectrum.ieee.org/computing/networks/why-the-internet-needs-cognitive-protocols>
- Liton, M. (2018). *How much data comes from the internet of things?*. *Machine data and analytics*. Retrieved from <https://www.sumologic.com/blog/machine-data-analytics/iot-devices-data-volume>
- Lott, C., & Teneketzis, D. (2006). Stochastic routing in ad-hoc networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(1), 52-70. ISSN 0018-9286. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.860280>
- Machado, K., et al. (2013). A routing protocol based on energy and link quality for internet of things applications. *Sensors*, 13(2), 1942-1964. ISSN 1424-8220. <https://doi.org/10.3390/s130201942>
- Martin-Vide, C., et al. (2003). Tissue P systems. *Theoretical Computer Science*, 296(2), 295-326. ISSN 0304-3975. [https://doi.org/10.1016/S0304-3975\(02\)00659-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3975(02)00659-X)
- Minerva, R., Biru, A., & Rotondi, D. (2015). *Towards a definition of the Internet of Things (IoT)*. *IEEE Internet*

- Initiative*. Retrieved from https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf
- Musolesi, M., & Mascolo, C. (2006). Evaluating context information predictability for autonomic communication. In *Proceedings of the 2006 International Symposium on on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. IEEE Computer Society, Buffalo-Niagara Falls, NY, (pp. 495-499). <https://doi.org/10.1109/WOWMOM.2006.41>
- Nasser, N., et al. (2017). Routing in the internet of things. In *2017 IEEE Global Communications Conference*. New York, IEEE. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8253955>
- López-Matencio, P. J. V.-A., & Costa-Montenegro, E. (2017). ANT: agent stigmergy-based iot-network for enhanced tourist mobility. *Mobile Information Systems*, 2017, 15. <https://doi.org/10.1155/2017/1328127>
- Paun, G. (2000). Computing with membranes. *Journal of Computer and System Sciences*, 61(1), 108-143. ISSN 0022-0000. <https://doi.org/10.1006/jcss.1999.1693>
- Paun, G., & Rozenberg, G. (2002). A guide to membrane computing. *Theoretical Computer Science*, 287(1), 73-100. ISSN 0304-3975. [https://doi.org/10.1016/S0304-3975\(02\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3975(02)00136-6)
- Paun, G., Rozenberg, G., & Salomaa, A. (2010). *The Oxford handbook of membrane computing*. Oxford University Press, Inc. (696 p.). ISBN 0199556679, 9780199556670. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11467-0>
- Zhang, G. (2017). *Real-life applications with membrane computing*. New York, NY, Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783319559872. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55989-6>
- Zhang, G. X., et al. (2014). Evolutionary membrane computing, a comprehensive survey and new results. *Information Sciences*, 279, 528-551. ISSN 0020-0255. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.007>

MEMBRANE COMPUTING AND INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES

A. Gedminas

Abstract

The Internet of Things collects a variety of sensor data, independently offers problem-solving solutions and allows them to be avoided. In order for these systems to function continuously, it is necessary to apply intelligent information routing algorithms. In order to discover new algorithms for the routing of the Internet of Things, this article reviews bioinspired algorithms, their advantages and disadvantages. We introduce membrane computing, P system and its membrane structure. Paper analyses different types of communication on the Internet of Things and classification of routing algorithms for the Internet of Things communication. The practical application of membrane computing and the possibility of applying membrane computing on the Internet of Things is also reviewed.

Keywords: internet of things, membrane computing, P system, natural computing.