

Rinnakkainen reitinhaku videopeleissä

Santeri Martikainen

Kandidaatintutkielma
HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 1. joulukuuta 2016

Tiedekunta — Fakultet — Faculty	Laitos — Institution — Department			
Matemaattis-luonnonlaitos	Tietojenkäsittelytieteen laitos			
Tekijä — Författare — Author				
Santeri Martikainen				
Työn nimi — Arbetets titel — Title				
Rinnakkainen reitinhaku videopeleissä				
Oppiaine — Läroämne — Subject				
Tietojenkäsittelytiede				
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages		
Kandidaatintutkielma	1. joulukuuta 2016	8		
Tiivistelmä — Referat — Abstract				
Tiivistelmä.				
Avainsanat — Nyckelord — Keywords				
avainsana 1, avainsana 2, avainsana 3				
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited				
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information				

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Reitinhaku	1
2.1	A*-algoritmi	2
3	Rinnakkainen reitinhaku	3
3.1	Local Repair A*	3
3.2	Cooperative A*	3
3.3	Hierarchical Operative A*	4
3.4	Windowed Hierarchical Operative A*	5
3.5	Conflict-Based Search	6
3.6	Multi-agent Rapidly-exploring Random Tree eli MA-RRT*	7
	Lähteet	8

1 Johdanto

Tässä tutkielman massassa keskitytään tarkastelemaan reitinhakua tietokonepelien saralla ja erityisesti algoritmeja, jotka ovat suunniteltu tilanteeseen, jossa monta eri toimijaa (agent) jakaa saman tilan ja joille kaikille on löydettyä reitti kohteesensa joillakin reunaehdoilla. Reitinhaussa on pohjimmiltaan kyse mahdollisimman suoran ja nopean polun löytämisestä kahden pisteen välillä jossakin topologiassa. Pelimaailman topologia eli kenttä tai alue, jolla pelaaja ja mahdolliset ei-pelaajahahmot voivat liikkua, voi olla ulkoasultaan hyvin abstrakti ja pelkistetty, tai toisaalta vaikuttaa hyvinkin realistiselta maastolta puineen, vesistöineen, rakennuksineen ja niin edelleen.

Tyypillisesti kenttä muodostetaan soluista (cell), joista toisinaan käytetään myös nimitystä laatta (tile). Solut ovat käytännössä joko kolmioita, nelioitä tai kuusikulmioita, sillä nämä ovat ainotarvittavat monikulmiot joita yhdistämällä voidaan jokin alue kattaa yhtenäisesti ilman väliin jääviä aukkoja. Solut joissa pelihahmot voivat liikkua muodostavat reitinhaussa käytettävän verkon (graph) solmut [1].

Kyseessä on siis verkko $G=(V,E)$, missä V (vertex) on joukko solmuja ja E (edge) joukko solmuja yhdistäviä kaaria. Liikkuminen voi tapahtua joko solmusta toiseen, tai sitten solmut voivat edustaa kiintopisteitä joiden läheisyydessä voidaan liikkua ilman erillistä reitinhakua. Solmut voivat myös toimia esteinä, jolloin niihin liikkuminen on estetty. Tämä voi myös olla vain väliaikainen tila esimerkiksi jonkun toisen toimijan ollessa liikkumisen tiellä. Molemmissa tapauksissa täytyy luonnollisesti löytää reitti esteen ympäri. Topologia voi siis olla dynaaminen, eli sen rakenne saattaa muuttua kesken reittien läpikäymisen, mikä asettaa omat haasteensa reitinhaulle [1, 2].

2 Reitinhaku

Realismia tavoittelevassa pelimaailmassa esteitä ovat luonnollisesti kaikki sellaiset objektit, jotka olisivat reaalimaailmassakin esteitä, kuten puut tai seinät. Siten pelissä liikkuva hahmo ei usein voi kulkea kahden pisteen välillä suoraan, vaan esteiden ympäri on löydettyä jokin reitti, jonka löytämiseen sovelletaan reitinetsintäalgoritmeja.

Reitinetsintä jakaantuu kahteen vaiheeseen: Toimintaympäristöstä muodostetaan ensin yksinkertaistettu malli, minkä jälkeen sitä käydään läpi jollakin algoritmilla halutun reitin löytämiseksi. Algoritmia ohjaavat heuristiikkafunktio, jolla arvioidaan etäisyyttä kohteesseen.

Peliteollisuuden standardialgoritmi tähän tarkoitukseen on nimeltään A^* (eli A-star tai A-tähti), josta on kehitetty lukuisia eri variantteja eri toimintaympäristöjä ja tarpeita silmälläpitäen [3, 4].

2.1 A*-algoritmi

A* toteuttaa niin sanottua paras ensin -tyyliä, jossa jokaisen solmun tai solun kohdalla pyritään ensiksi etenemään suoraan kohti maalia. Jos tiellä on jokin este, algoritmi pyrkii kiertämään sen pyrkimällä viereisiin soluihin ja sieltä jälleen maalia kohti kunnes joko päästääseen kohteeseen, tai reittiä ei voida löytää. Algoritmin läpikäymille solmuille lasketaan arvo kaavalla

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

missä $g(n)$ on lyhin tunnettu reitti lähtösolmesta solmuun n ja $h(n)$ on heuristinen arvio etäisyydestä maalisolmuun [3, 5]. Näin jokaisen läpikäydyn solmun kohdalla tiedetään sillä lasketusta arvosta kuinka suoralla reitillä kohteeseen ollaan. Solmuille voidaan myös asettaa edellämainittuun kaavaan lisättävä arvo tekemään siihen siirtymisestä hintavampaa ja näin mallintaa hitaampaa kulkuyhteyttä kahden paikan välillä.

[muotoilu, lähde, kieli/käännös, tyyli?]

```
// A*-algoritmi pseudokoodina

initialize the open list
initialize the closed list
put the starting node on the open list (you can leave its f at zero)

while the open list is not empty
    find the node with the least f on the open list, call it "q"
    pop q off the open list
    generate q's 8 successors and set their parents to q
    for each successor
        if successor is the goal, stop the search
        successor.g = q.g + distance between successor and q
        successor.h = distance from goal to successor
        successor.f = successor.g + successor.h

        if a node with the same position as successor is in the OPEN
        list
            which has a lower f than successor, skip this successor
        if a node with the same position as successor is in the CLOSED
        list
            which has a lower f than successor, skip this successor
            otherwise, add the node to the open list
    end
    push q on the closed list
```

end

3 Rinnakkainen reitinhaku

Videopeleissä on yleensä useita, jopa satoja tai tuhansia, eri toimijoita, joille on löydetvä reitit kohteisiinsa. Tällainen monen toimijan rinnakkainen reitinhaku (multi-agent pathfinding, MAPF) tuo yksittäisen toimijan reitinhakuun verrattuna uusia ongelmia. On ratkaistava muun muassa sallitaanko reittien risteäminen, voiko kaksi tai useampi toimijaa olla samaan aikaan samassa paikassa ja tuleeko liikkumista porrastaa odottamalla että reitti edessä vapautuu [6]. Näiden ongelmien ratkaisemiseen on kehitetty useita eri algoritmeja, joista useimmat hyödyntävät A*-algoritmia [3].

3.1 Local Repair A*

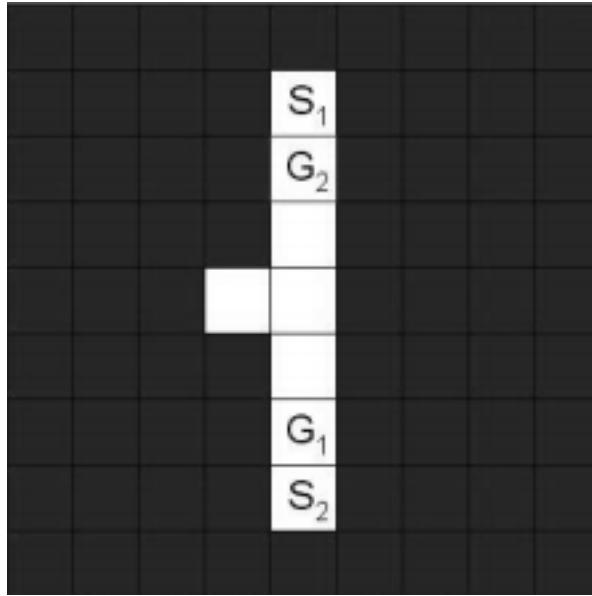
LRA* on itse asiassa yleistermi joukolle A*-pohjaisia algoritmeja, jotka jakavat saman toimintaperiaatteet: Jokainen toimija etsii reitin A*:lla ja seuraa sitä siihen asti kunnes siirtyminen seuraavaan solmuun saisi aikaan yhteen törmäyksen jonkin toisen toimijan kanssa, eli solmu johon pitäisi siirtyä on varattu. Tällöin tehdään uusi A*-haku ja jatketaan niin kauan kunnes on tultu maaliin.

Syklit ovat tässä menetelmässä sekä mahdollisia että yleisiä, joten ongelma on pyritty ratkaisemaan lisäämällä niin kutsuttua kohinaa etäisyysheuristiikkaan joka kerta kun yhteen törmäys havaitaan [7]. Jos siis jatkuvasti kohdataan esteitä jossakin solmussa tai jollakin alueella, niin algoritmin laskeman kustannuksen sinne etenemisestä pitäisi ennenpitkää nousta niin suureksi, että toimija hakeutuu ongelma-alueen ympäri tai etsii kokonaan uuden reitin.

Tällainen lähestymistapa johtaa ruuhkatilanteissa helposti oudolta näytävään poukkoiluun, ja sen myötä prosessoriajan hävikkiin kun jokaisen yhteen törmäyksen yhteydessä reitti pitää laskea uudestaan.

3.2 Cooperative A*

CA* pyrkii estämään yhteen törmäykset ennalta ottamalla aikaulottuvuuden huomioon reittejä suunniteltaessa. Jokaiselle toimijalle lasketaan reitti A*-algoritmillä ja suunnitellun reitin solut merkitään taulukkoon, esimerkiksi kolmiulotteiseen hajautustauluun, jossa kaksi ensimmäistä alkiota merkitsevät x- ja y-koordinaatteja, ja kolmas alkio aikaa milloin kyseinen solmu on tämän toimijan käytössä. Nyt seuraavien toimijoiden reittejä laskettaessa voidaan verrata suunniteltuja askeleita edellämainittuun taulukkoon ja odottamalla havaituissa törmäystilanteissa halutun reittisolmun vapautumista.



Kuva 1: Kuva 1: Esimerkki kohtaamis-ongelmasta, jossa toimijat S1 ja S2 voivat päästää maalisolmuihin G1 ja G2 vain jos jompikumpi väistää sivulle.

Tämän algoritmin heikkoutena on kyvyttömyys ratkaista joitakin verrataen yksinkertaisia tilanteita. Kuvassa 1 nähdään tilanne, missä toimijat S1 ja S2 pyrkivät vastaanostamaalleihin G1 ja G2. Vaikka intuitiivisesti nähdään, että jommankumman toimijan olisi mahdollista joko väistää sivulle tai vaihtaa paikkoja törmätessään ja siten ratkaista kohtaamisongelma, ei Cooperative A* pysty tällaiseen ratkaisuun, vaan toimijat eivät koskaan pääse maaliin.

3.3 Hierarchical Operative A*

R.C.Holte ja kumppanit esittelivät vuonna 1996 hierarkkisen A*-reitinetsintää-algoritmin HA* [8] ratkaisemaan CA*-algoritmin ongelmia. Siinä varsinaisen topologian rinnalla käytetään toista, abstraktia, topologiaa auttamaan A*-algoritmia löytämään kohteeseen. Alkuperäisen topologian solmut ryhmitetään halutun abstraktioetäisyyden perusteella isomiksi abstraktiosolmuiksi, ja tästä jatketaan rekursiivisesti niin kauan, kunnes koko topologiasta on muodostettu yksittäinen abstraktiosolmu. Varsinaisen topologian rinnalla on nyt siis monitasoinen abstraktiohierarkia, jonka alimmalla tasolla on alkuperäinen topologia. Tätä monitasoista hierarkiaa käytetään heuristiikan apuna ja liikkumalla siinä tasolta toiselle sen mukaan miten tarkkaa jakoa esimerkiksi esteiden ympärillä tarvitaan, ja käyttämällä sen antamia etäisyksiä reitinhakualgoritmin apuna. Etäisyydet kohteeseen lasketaan vain

tarvittaessa dynaamisesti muuttuvasta ympäristöstä johtuen [7]. [aukaisu]

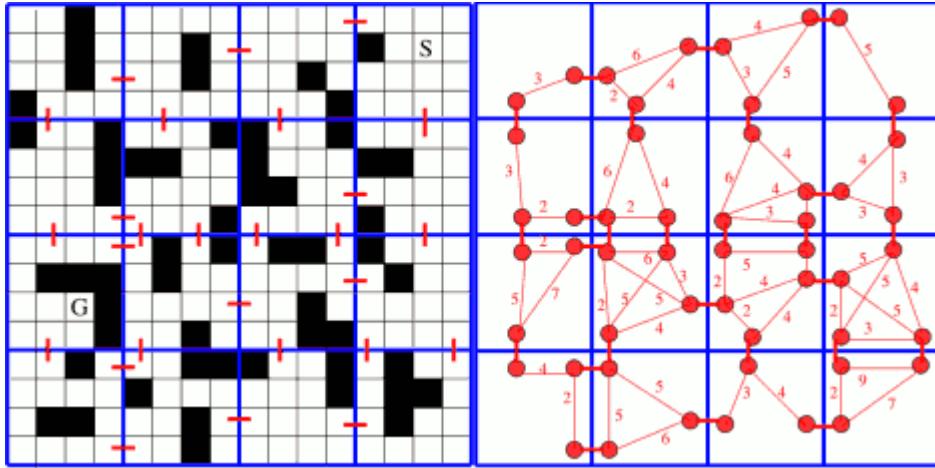
HCA* eli hierarkkinen yhteistoiminnallinen A*-reitinetsintäalgoritmi puolestaan käyttää yksinkertaistettua hierarkiaa, joka koostuu vain yhdestä topologian kaksiulotteisesta abstraktiosta jättäen huomiotta niin aikaulottuvuuden, solmujen varaustaulun, kuin muut toimijat. Kuvassa 2 nähdään esimerkki topologian abstraktiosta, missä vasemmalla oleva ruudukko on mallinnettu graafiksi jakamalla se isommiksi abstraktiosolmuiksi (siniset kehykset). Kirjaimet S ja G viittaavat lähtö- ja maalisolmuihin. Oikeanpuoleisessa kuvaan on puolestaan merkitty punaisella jokaisen abstraktiosolmun sisällä elevat solmut ja niitä yhdistävät kaaret. Kaaren vierellä oleva luku tarkoittaa kaaren painoa, eli kuinka suuri hinta kaaren kulkemisella on.

Kun reitti on laskettava uudelleen esimerkiksi jonkin toisen toimijan tullessa eteen, pyritään säätämään resursseja käytämällä käänteistä jatkettavaa A*-hakua RRA* (Reverse Resumable A*) abstraktiotasolla. Siinä missä alkuperäinen reitti haettiin lähtöpisteestä maaliin, RRA* etsii reitin maalista haluttuun solmuun, kuten toimijaa lähimpään abstraktiotason solmuun [7]. Mikäli tässä vaiheessa optimaalisen reitin varrella on muita toimijoita, tulee lasketusta reitistä näiden väistämisen vuoksi luonnollisesti pidempi, aivan kuten alkuperäisen reitinhaunkin suhteen.

Ongelmana tämän algoritmin käytössä on reitinhaun lopettamisen määritteleminen, sillä vaikka jokin toimija olisi jo tullut päämääränsä, sen täytyy mahdollisesti vielä väistää joitain toista toimijaa ja hakeutua tämän jälkeen uudestaan maaliin [1]. Niinikään toimijoiden vuorojärjestyksellä on väliä: Staattinen vuorottelu voi johtaa siihen, ettei reittiä maaliin koskaan löydetä joidenkin toimijoiden sulkiessa toisiltaan tien. Tämä voidaan välttää antamalla toimijoille erilaiset prioriteetit jo alun alkaen, tai sitten sitten korkeampi prioriteetti voidaan antaa halutuille toimijoille vuorotellen lyhyeksi aikaa [7]. Tässä, kuten aiemmissakin yhteistoiminnallisissa reitinhakualgoritmeissa, on resurssien käytön suhteen ongelmana potentiaalisesti turhaan tehty työ.

3.4 Windowed Hierarchical Operative A*

WHCA* eroaa HCA*:sta siinä, että konkreettisen topologian tasolla reittejä ei lasketa maaliin asti, vaan reitinhaku on rajoitettu johonkin ennaltamääriteltyyn syvyyteen. Jotta toimijat saadaan hakeutumaan varmasti oikeaan suuntaan, lasketaan reitti abstraktiotasolla sen sijaan maaliin asti [7, 1]. Kun reittiä on kuljettu johonkin ennaltamääriteltyyn raja-arvoon asti, kuten puolel aiemmin lasketusta reitistä, lasketaan uusi osittainen reitti ja niin edelleen. "Windowed" tarkoittaa tässä siis aikaikkunaa tai kehystä, mihin asti konkreettinen reitti on nähtävillä ja mitä siirretään aina tarpeen mukaan.



Kuva 2: Kuva 2: Vasemmalla olevasta ruudukosta on muodostettu hierarkiamallin mukainen abstraktio.

Resurssien käyttöä voidaan myös tasata antamalla toimijoille erikokoiset ikkunat, niin että taakka reittien laskemisesta jakautuu mahdollisimman tasaisesti ajan suhteen. Kuten HCA*, myös WHCA* hyödyntää RRA*:ta ja hyödyntää edellisen ikkunan aikana tehtyä hakua, mikä luonnollisesti tarkoittaa toimijakohtaista kirjanpitoa läpikäydyistä solmuista.

3.5 Conflict-Based Search

Rinnakkaisen reitinhaun optimoimiseen pyrkivä CBS-algoritmi [3] käyttää kaksitasonista lähestymistapaa, missä ensin käydään läpi ylemmän tason binääristä rajoituspuuta (constraint tree). Rajoituspuun jokaisessa solmussa on joukko rajoitteita (tieto siitä milloin joku topologian solmu on jonkun toimijan varamaa), jotka kuuluvat jollekin yksittäiselle toimijalle. Toiseksi rajoituspuun solmuihin on myös talletettu joukko alemmalta tasolta saatuja reittejä, yksi jokaista toimijaa kohti, joiden tulee olla vapaita tiedetyistä yhteentörmyksistä. Kolmantena niissä on myös yhteenlaskettu solmun reittikustannus, joka koostuu yksittäisen toimijan koko siihenastisen polun kustannuksesta. Rajoituspuu on järjestetty reittikustannuksen mukaan.

Alemmalla tasolla puolestaan voidaan käyttää tavanomaista yhden toimijan reitinhakualgoritmia kuten A* käyttäen samalla hyväksi ylemmältä tasolta saatua tietoa siitä, milloin ja missä on odotettavissa yhteentörmyys jonkun toisen toimijan kanssa. Mikäli kaikesta huolimatta alemalla tasolla havaitaan yhteentörmyksiä, päivitetään ylemmän tason rajoituspuuta vastaavasti ja laajennetaan rajoituspuuta lisäämällä siihen solmuja uusin rajoittein. [selvennys, solmujen lapset]

[Improved Conflict-Based Search]

3.6 Multi-agent Rapidly-exploring Random Tree eli MA-RRT*

Lähteet

- [1] Botea A.; Bouzy B.; Buro M.; Bauckhage C.; Nau D. Pathfinding in games. *Artificial and Computational Intelligence in Games*, pages 21 – 31, 2013.
- [2] Algfoor Z.A.; Sunar M.S.; Kolivand H. A comprehensive study on pathfinding techniques for robotics and video games. *International Journal of Computer Games Technology*, 2015.
- [3] R.; Felner A. Sharon, G.; Stern. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. *Artificial Intelligence*, 2015.
- [4] Botea A.; Müller M.; Schaeffer J. Near optimal hierarchical path-finding. *Journal of Game Development*, 2004.
- [5] Stout B. Smart moves: Intelligent pathfinding. *Game Developer Magazine*, July 1997.
- [6] Erdem E.; et al. A general formal framework for pathfinding problems with multiple agents. *AAAI*, 2013.
- [7] Silver D. Cooperative pathfinding. *In Proc. of AIIDE*, pages 117 – 122, 2005.
- [8] Holte R.C.; Perez M.B.; Zimmer R.M.; MacDonald A.J. Hierarchical a*: Searching abstraction hierarchies efficiently. *AAAI/IAAI*, Vol. 1, 1996.