

Mars-luotainten reitinhakualgoritmit ja visuaalinen paikantaminen

Jerry Mesimäki

Kandidaatintutkielma
HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 2. joulukuuta 2014

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Tietojenkäsittelytieteen laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Jerry Mesimäki			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Mars-luotainten reitinhakualgoritmit ja visuaalinen paikantaminen			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Tietojenkäsittelytiede			
Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Kandidaatintutkielma	2. joulukuuta 2014	21	
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	MER eli Mars Exploration Rover	2
2.1	Mönkijöitä koskevan tehtävän pääasialliset tavoitteet	2
2.2	Laitteisto	3
2.2.1	Vaatimukset	3
2.2.2	Fyysiset ominaisuudet	3
2.2.3	Käsivarsi	4
2.2.4	Kamerat	4
2.2.5	Spektrometrit	6
2.2.6	Kivihierin (Rock Abrasion Tool, RAT)	6
2.3	AutoNav	6
2.4	GESTALT ennen globaalia reitinsuunnittelua	7
2.5	Päivitetty GESTALT	7
3	Field D* ja lineaarinen interpolointi	7
3.1	Aikaisemmat algoritmit	7
3.2	Kustannusarvion parantaminen interpoloinnin avulla	8
3.3	Field D*	11
4	Visuaalinen odometria	12
4.1	Algoritmi	13
4.1.1	Piirteiden tunnistus	13
4.1.2	Piirreperusteinen syvyyden estimointi stereokuvia käyt- täten	14
4.1.3	Piirteiden seuraaminen	15
4.1.4	Liikkeen luotettava arviointi	16
4.2	Algoritmin validointi Maan pinnalla	18
4.3	Visuaalinen odometria Marsin pinnalla	18
5	Mönkijöiden kehittyminen tulevaisuudessa	20
6	Yhteenveto	20

1 Johdanto

Ihmiskunta on ollut kiinnostunut avaruudesta ja erityisesti lähiplaneetoistaan jo useita satoja vuosia. Tähtitieteen historiaan mahtuu monia merkittäviä läpimurtoja kuten aurinkokeskeisen maailmankuvan ymmärtäminen ja vuoden 1969 Apollo-ohjelman miehitetty lento Kuuhun. Intressit avaruuden tutkimiselle kasvavat jatkuvasti ja viimevuosina myös kaupalliset tahot ovat luoneet työllisyyttä esimerkiksi avaruusturismin avulla. Jotkin yritykset tutkailevat jo mahdollisuuksia kaivaa kallisarvoisia mineraaleja planeettaamme kiertävistä asteroideista. Kaikki tämä vaatii useiden eri tieteenalojen yhteistyötä, jotta teknologiat kehittyisivät vastaamaan avaruuden asettamiin haasteisiin.

Viimeisten vuosikymmenten aikana keskeisiksi tutkimusvälineiksi aurinkokuntamme kartoittamisessa ovat muodostuneet miehittämättömät avaruusluotaimet, joiden avulla tiedemiehet ovat keränneet huomattavia määriä kiinnostavaa dataa Maan naapureista. Tänä päivänä luotaimia löytyy jo useimpien planeettojen kiertoradoilta, Venuksen ja Marsin pinnoilta sekä tuoreimpien arvioiden mukaan myös Aurinkokunnan ulkopuolelta.

Kosmisessa mittakaavassa etäisyydet ovat aivan omaa luokkaansa ja tästä syystä luotainten ohjaaminen Maasta käsin on useimmissa tapauksissa hidasta. Asiaa hankaloittaa myös se ettei reaaliaikaisen kuvan saaminen ole mahdollista vaikka radioaallot kulkevat valonnopeudella halki avaruuden. Tästä johtuen tiedemiehet ovat pyrkineet automatisoimaan erilaisin algoritmein luotaintensa toimintaa. Tekoälyä taas käytetään, jotta laite kykenisi suorittamaan sille annetut tehtävät mahdollisimman itsenäisesti. Esimerkiksi Mars-mönkijät pyrkivät väistelemään maastosta löytyviä vaaroja kuvaamalla omaa ympäristöään ja generoimaan kuvien perusteella itselleen suotuisia reittejä.

Uusimpien mönkijöiden kohdalla on jo mahdollista päivittää näiden ohjelmistoa vaikka ne sijaitsisivat toisella planeetalla. Siksi onkin oleellista jatkaa niissä käytettyjen ohjelmistojen kehittämistä vielä laukaisun jälkeen, jolloin laitteistojen potentiaalinen hyöty kasvaa ja tarve uusien laitteiden lähettämislle avaruuteen pienenee.

2 MER eli Mars Exploration Rover

Marsiin lähetettiin vuonna 2003 Nasan toimesta kaksi MER-laitetta (Mars Exploratorion Rover, myöhemmin mönkijä) – Spirit sekä Opportunity – etsimään merkkejä veden esiintymisestä planeetan pinnalta. Yksi ongelmista on mönkijöiden liikuttelu maasta käsin 26 minuuttia kestävän signaalin siirtymisestä aiheutuvan viiveen takia. Tyypillisesti laitteille lähetetään kommentoja vain aamuisin kerran Marsin vuorokaudessa (myöhemmin kierto), jotka ne toteuttavat kierron aikana. Ennen iltaa niiden keräämä data taas lähetetään Maahan analysoitavaksi. Tästä johtuen mönkijöiden riittävä autonomia on kriittistä, jotta ne kykenisivät liikkumaan mahdollisimman nopeasti tieteellisesti kiinnostavien kohteiden välillä.

Mönkijöitä voidaan liikuttaa kahdella eri tavalla: sokkoajona, jossa Maahan saapuneista kuvista päätellään mihin suuntaan on turvallista ajaa ja ajaminen suoritetaan vaaroista välittämättä haluttuun kohteeseen. Toinen vaihtoehto on luovuttaa vastuu ajamisesta mönkijöissä sijaitsevalle AutoNav-järjestelmälle, joka pyrkii liikkumaan haluttuun kohteeseen ottaen kuitenkin huomioon ympäristössä sijaitsevat vaarat ja väistämään niitä [CR09]. Useimmiten näitä käytetään yhdessä siten, että sokkoajoa sovelletaan niin pitkälle kuin saaduista kuvista päätellen on turvallista ja tämän jälkeen AutoNav jatkaa ajamista.

Ohjelmistopäivitysten lähettäminen toisella planeetalle sijaitseville mönkijöille oli myös ensimmäistä kertaa mahdollista Spiritin ja Opportunityn laskeuduttua onnistuneesti Marsin pinnalle. Tämän ansiosta viimeisen 11 vuoden aikana mönkijät ovatkin saaneet käyttöönsä esimerkiksi globaalin reitinsuunnittelun ja toistaiseksi tehtävänsä jatkavaa Opportunityä on edelleen mahdollista päivittää uusilla ominaisuuksilla.

2.1 Mönkijöitä koskevan tehtävän pääasialliset tavoitteet

Kokonaisuudessaan tehtävä käsittää seitsemän selkeää tavoitetta, joiden saavuttamiseksi mönkijöitä tarvittiin:

1. Erilaisten kivien ja maa-ainesten etsintä, jotka osoittavat merkkejä veden esiintymisestä.

2. Mönkijöiden laskeutumisalueita ympäröivän maaperän analysointi.
3. Erilaisten planeettaa muovanneiden geologisten prosessien tunnistaminen, kuten eroosio ja vulkaanisuus.
4. Kiertoradalta tehtyjen havaintojen paikkaansapitävyyden tarkistaminen.
5. Rautapitoisten mineraalien etsiminen ja vettä pitävien tai vedessä muodostuneiden ainesten suhteellisen määrän mittaaminen.
6. Maaperän mineraloginen havainnointi ja sellaisten tietojen kerääminen, joiden perusteella voidaan päätellä kiven sekä maa-aineksen synnyttäneet prosessit.
7. Geologisten vihjeiden etsintä, jotka kertovat planeetan ympäristöolosuhteista ajalta jolloin pinnalla vielä oli vettä sekä arvion tekeminen siitä olivatko ne suotuisia elämän synnylle.

2.2 Laitteisto

2.2.1 Vaatimukset

Mönkijöitä koskee joukko liikkeestä vastaavalle laitteistolle asetettuja vähimmäisvaatimuksia: Tarve ylittää 25cm korkuiset esteet, matkata ainakin yksi kilometri laskeutumispaikalta vaihtelevassa maastossa, sietää lämpötilavaihteluja -100C:sta 20C:een ja säilyä toimintakykyisenä 90 Marsin vuorokautta. [LBH⁺06]

2.2.2 Fyysiset ominaisuudet

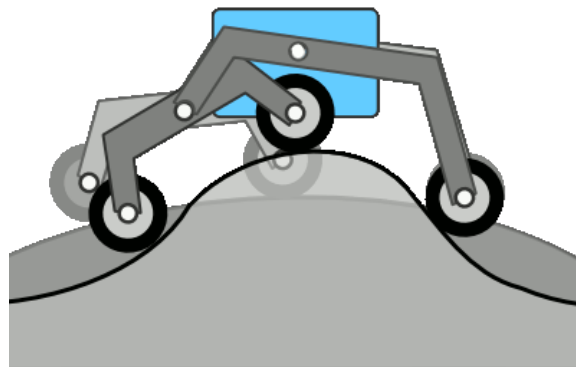
Mönkijöiden pohja on noin 140cm pitkä ja 120cm leveä. Maksimileveys aurinkopaneelien kohdalla on 230cm ja pituus 150cm. Korkeutta molemmilla on enimmillään 150cm, josta 30cm on maavaraa. Täysin varusteltunta yksi mönkijä painaa 176.5 kg.

Liikkuminen tapahtuu kuudella renkaalla, joista neljää voidaan kääntää toisistaan riippumatta, joka mahdollistaa esimerkiksi kääntymisen paikallaan. Jokaista rengasta voidaan myös pyörittää muista riippumatta ja niiden pinta

on nappulakenkämäisillä napeilla pidon lisäämiseksi. Mönkijöissä on kuvan esittämä rocker-bogie jousitus [HV04], jonka avulla liike vaihtelevassa ja erityisesti kaltevassa maastossa helpottuu. Laitteiden saavuttama huippunopeus on 4.6 cm/s tasaisella kovalla maastolla.

Laitteiston osalta haasteita suunnittelun osalta aiheutti se ettei Marsissa ole ennen Spiritiä ja Opportunityä käynyt muita mönkijöitä kuin vuonna 1997 sinne lähetetty Sojourner, jonka matka kesti hieman alle kolme kuukautta. Tutkijoiden tuli siis pääasiassa luottaa Maan pinnalla tehtyihin kokeiluihin, joissa yritettiin simuloida mahdollisimman tarkasti Marsin olosuhteita. [LBH⁺06]

Kuva 1: Rocker-bogie jousituksella varustettu mönkijä tilanteessa, jossa etu- ja takarenkaat ovat kaltevilla pinnoilla.



2.2.3 Käsivarsi

Erinäisten tieteellisten instrumenttien liikuttelua varten mönkijöihin on sijoitettu kolminivelinen ihmisen käsivartta mukaileva titaaninen käsivarsi (instrument deployment device, IDD).[NAS14c]

2.2.4 Kamerate

2.2.4.1 Panoraamakamera (Pancam)

Mönkijän mastoon on kiinnitetty kaksi CCD-kennolla varustettua kameraa, jotka yhdessä muodostavat panoraamakameran. Kameraa voidaan kääntää 360 astetta pystyakselilla sekä 180 astetta horisontaalisella akselilla, jolloin

mönkijä kykenee muodostamaan parhaimmillaan 96 miljoonan pikselin panoraamakuvia omasta ympäristöstään. Tarkkuudella pyritään jäljittelemään ihmisen näkökykyä. Panoraamakamera kykenee myös päivittämään Auringon sijainnin perusteella oman suuntansa.[NAS14d]

2.2.4.2 Vaarakamera (Hazcam)

Vaarakamera koostuu panoramakameran tavoin kahdesta erillisestä yksiköstä, jotka yhdessä auttavat mönkijää luomaan kolmiulotteista mallia tämän ympäröimästä maastosta. Vaarakameroita on kaksi ja ne on sijoitettu mönkijän alaosiin etu- ja takapuolelle. Niiden tehtävänä on erityisesti kuvata maata, jotta vaaralliset esteet voitaisiin kiertää turvallisesti.[NAS14d]

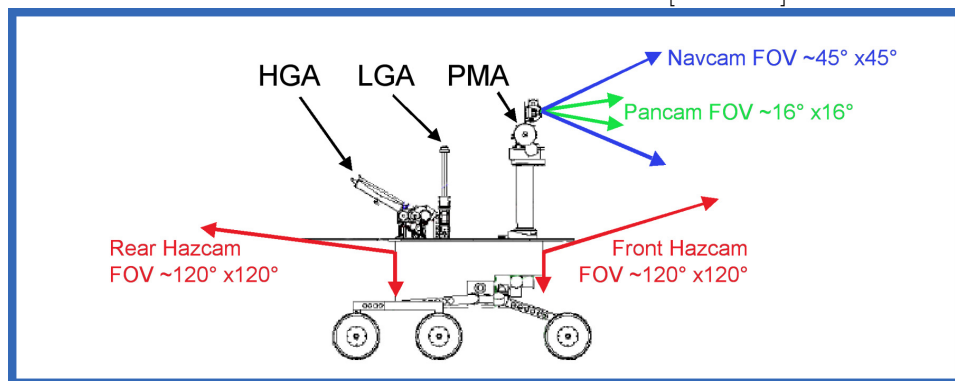
2.2.4.3 Navigointikamera (Navcam)

Visuaalisessa odometriassa käytettävä kuvamateriaali tulee pääosin kahdesta kamerasta koostuvasta stereokuvapareja ottavasta navigointikamerasta. Se on kiinnitetty panoraamakameran kanssa samaan mastoon.[NAS14d]

2.2.4.4 Mikroskooppikamera

Käsivarresta löytyvä mikroskooppi toimii yhdessä CCD-kennollisen kameras kanssa ja sillä pyritään analysoimaan erityisesti merkkejä veden aikaisemasta esiintymisestä maaperässä.[NAS14a]

Kuva 2: Kameran havainnollistettuna [NAS14d]



2.2.5 Spektrometrit

Molemmissa mönkijöissä on kolme spektrometriä, joiden tarkoituksena on tehdä havaintoja laitteiden ympäristöstä esimerkiksi mittaamalla maa-aineksista lähteviä termisiä emissioita ja analysoimalla ympäristöön kohdistettujen röntgensäteiden sekä alfahiukkasten käyttäytymistä.[NAS14e]

2.2.6 Kivihierin (Rock Abrasion Tool, RAT)

Marsin pinnalla sijaitsevat kivet ovat pölyn peitossa ja niiden läpikotaista tutkimista varten käsivarteen on kiinnitetty hierin, jonka tehtävänä on tehdä kiven pintaan noin 45 millimetrin syvyinen kuoppa. Paljastunut kiviaines saattaa olla pintaan verrattuna hyvinkin erilainen ja sitä analysoimalla voidaan tehdä päätelmiä kiven syntyperästä sekä syntymisen aikana vallinneesta ilmastosta.[NAS14b]

2.3 AutoNav

AutoNav perustuu GESTALT-algoritmiin (grid-based estimation of surface traversability applied to local terrain), jossa mönkijän stereokameroiden ottamista kuvista luodaan malli tämän välittömästä ympäristöstä [CR09]. Yksi osa mallista on ruudukkopohjainen hyvyyskartta. Kartalla jokainen solu saa sen ajettavuutta kuvaava hyvyysarvon. Hankala maasto tuottaa matalan arvon ja helppo maasto korkean. Maastoa, jota mönkijä ei voi läpäistä levitetään kartalla mönkijän koon verran, jolloin laite voidaan sijoittaa pisteeksi kartalle laskentaa varten.

Kartoituksen jälkeen järjestelmä luo joukon kaaria, joita pitkin kulke-
malla voidaan saavuttaa haluttu kohde. Mikäli kaari ei ole suora niin sille
lasketaan myös kääntymispisteet. Jokaista kaarta arvioidaan kolmella kritee-
rillä: vaarojen välttely, kääntymisajan minimointi ja kohteen saavuttaminen.
Arvion perusteella sovellus järjestää kaarien välille äänestyksen siten, että
hyvyyskartalla turvallisille kaarille annetaan enemmän ääniä kuin turvatto-
mille, kääntymispisteiden lukumäärä korreloi negatiivisesti annettujen äänien
kanssa ja mönkijää lähemmäksi kohti kohdetta vievät kaaret saavat enemmän
ääniä. Äänet lasketaan tämän jälkeen yhteen ja mönkijä ajaa pienen ennalta
määrätyn matkan voittanutta kaarta. Edellä selitettyä prosessia toistetaan

kunnes kohde saavutetaan, ennalta määrätty tavoiteaika ylittyy tai tapahtuu virhe.

Ongelmaksi MER-laitteiden järjestelmän ensimmäisessä versiossa muodostui tilanne, jossa mönkijä kohtasi riittävän ison kiviröykkiön. Sen kiertämiseksi olisi jouduttu valitsemaan sellainen kaari, joka ei vie mönkijää riittävän suoraan kohti kohdetta. Suoremmat kaaret taas kulkivat kivien yli. Tilanne aiheutti äänestysvaiheessa konfliktin, jossa vaaran välttäminen oli liian suuressa konfliktissa suorimman reitin haun kanssa. Järjestelmä ei antanut mönkijän liikkua mihinkään suuntaan.

2.4 GESTALT ennen globaalia reitinsuunnittelua

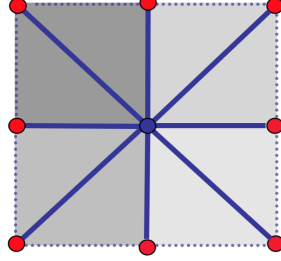
2.5 Päivitetty GESTALT

3 Field D* ja lineaarinen interpolointi

3.1 Aikaisemmat algoritmit

Useimmissa mobiilirobotiikan navigaatiosovelluksissa ympäristöä mallinnetaan ruudukkona, jossa jokainen ruutu saa arvokseen jonkin arvion sen kuljettavuudesta. Tällä tavoin robotti voi tarvittaessa väistää ympäristösään sijaitsevia esteitä tai liian vaaralliseksi koettuja alueita. Ruudukon lisäksi yleisesti käytetyt algoritmit generoivat myös verkon, jonka solmut sijoitetaan keskelle jokaista ruutua. Verkon kaaret muodostetaan ruudussa sijaitsevan solmun ja tämän naapuriruutuihin asetettujen solmujen välille. Tässä mallissa reitinhaku verkossa voidaan toteuttaa esimerkiksi Anthony Stentzin vuonna 1995 esittelemän D*-algoritmin avulla [Ste95]. Pääasialliseksi ongelmaksi jää kuitenkin em. kyky löytää vain sellaiset reitit, joissa robotti liikkuu $\pi/4$:n käännöksillä ruutujen välillä.

Kuva 3: Esimerkki 45 asteen käännöksiin rajoittuneesta ruudukosta. [CR09]



3.2 Kustannusarvion parantaminen interpoloinnin avulla

Algoritmin perustana toimii metodi, jossa jokaisesta ruudukossa sijaitsevasta solmusta lasketaan halvin mahdollinen kustannusarvio haluttuun kohdepisteeseen [FS07]. Perinteisesti ruudukkopohjaisessa reitinsuunnittelussa on käytetty seuraavaa kaavaa:

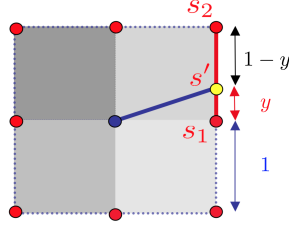
$$g(s) = \min_{s' \in nbs(s)} (c(s, s') + g(s')), \quad (1)$$

missä $nbs(s)$ on joukko kaikista solmun s naapureista, $c(s, s')$ on kustannus kulkemiselle kaarten s ja s' välillä, sekä $g(s')$ kustannusarvio solmulle s' .

Kaavassa 1 oletetaan, että solmusta s voidaan siirtyä tämän naapureihin ainoastaan suoraa linjaa pitkin, joka taas johtaa luvussa 3.1 mainittuun ongelmaan muodostaa parhaita mahdollisia reittejä robotin rajoittuneen suuntaamisen takia. Tämä voitaisiin korjata sijoittamalla s' :n tilalle s_b , jossa s_b on mikä tahansa piste solmuun liittyvän ruudun reunalla. Näitä pisteitä on kuitenkin ääretön määrä, joka tekee jokaisen pisteen laskennasta mahdotonta.

Muokkaamalla verkkoa voimme silti muodostaa approksimaation jokaiselle pisteelle s_b käyttäen lineaarista interpolointia. Sen sijaan, että solmu sijoitettaisiin ruudun keskelle, asetetaan solmu jokaisen ruudun kulmaan ja täten kaaret kulkevat ruudukon reunoja pitkin. Nyt yhden kaaren kustannus voidaan valita siten, että se on pienempi niistä kahdesta ruudusta joiden välillä se kulkee.

Kuva 4: Kustannus pisteeseen s' on mahdollista arvioida lineaarista interpolointia hyväksi käyttäen. [CR09]



Tämä muokkaus johtaa siihen, että paras mahdollinen reitti saattaa kulkea jotkin kaksi naapurisolmua $\overrightarrow{s_1 s_2}$ yhdistävän kaaren läpi (Kuva 2). Solmulle s voidaan nyt laskea kustannusarvio, kun reitti kulkee sen ruudun läpi em. kaarelle. Laskemista varten tarvitaan arviot solmujen s_1 ja s_2 sekä keskimmäisen ruudun c ja alemman ruudun b kustannuksista.

Kustannusarvion tuottamiseen käytetään vielä oletusta, että kustannusarvio mille tahansa pisteelle s_y , joka sijaitsee kaarella $\overrightarrow{s_1 s_2}$, on funktioiden $g(s_1)$ ja $g(s_2)$ lineaarikombinaatio:

$$g(s_y) = yg(s_2) + (1 - y)g(s_1), \quad (2)$$

missä y on etäisyys s_1 :stä s_y :hyn. Tulee kuitenkin huomata, että s_y ei välttämättä ole em. funktioiden lineaarikombinaatio, mutta tämän oletuksen tuottama approksimaatio toimii käytännössä riittävän hyvin kun halutaan muodostaa suljettu muoto solmun s kustannusarvion palauttavalle funktiolle.

Kun tiedetään s_1 , s_2 , ruutukustannukset c ja b niin approksimaation perusteella solmun s kustannus voidaan laskea seuraavasti:

$$\min_{x,y} [bx + c\sqrt{(1-x)^2 + y^2} + g(s_2)y + g(s_1)(1-y)], \quad (3)$$

missä $x \in [0, 1]$ on solmusta s alareunaa pitkin kuljettu matka kunnes käännytään ruudun yli kohti oikeaa reunaa pisteeseen, joka on $y \in [0, 1]$ etäisyyden päässä solmusta s_1 .

Tehdään vielä oletus, että (x^*, y^*) ovat x :n ja y :n arvot, joilla ylläoleva kaava saadaan ratkaistua. Lineaarisen interpoloinnin johdosta toinen arvoista on joko yksi tai nolla. Mikäli kustannus liikkua ruudun c yli on pienempi kuin ruudun reunoja pitkin kulkeminen niin halvin reitti halkaisee ruudun

c ja täten joko $x^* = 0$ tai $y^* = 1$. Jos taas polku ei halkaise ruutua c niin $y^* = 0$. Täten polku on kulkee solmusta s suoraan alareunaa pitkin kohtia solmua s_1 , siirtyy jonkin matkan x alareunalla ja leikkaa tämän jälkeen ruudun halki suoraan solmuun s_2 , tai halkaisee ruudun c kulkemalla suoraan solmusta s johonkin oikean reunan pisteeseen s_y . Halvin polku riippuu c :n ja b :n koosta, sekä s_1 :n ja s_2 :n kustannuserosta $f = g(s_1) - g(s_2)$. Mikäli $f < 0$ niin paras mahdollinen polku on 1. tapaus, jos taas $f = b$ niin polun kustannus kulkien jonkin matkan alareunaa on yhtäpitävä sen kanssa, että alareunaa ei kuljeta ollenkaan. Jälkimmäisestä polusta voidaan ratkaista kustannuksen minimoiva y seuraavasti.

Olkoon $k = f = b$. Kustannus $\delta(s, \overrightarrow{s_1 s_2})$ solmusta s kaaren $\overrightarrow{s_1 s_2}$ lävitse on

$$c\sqrt{1+y^2} + k(1-y) + g(s_2). \quad (4)$$

Kustannuksen derivaatasta suhteessa y :hyn ja asettamalla se nolaksi saadaan

$$y^* = \sqrt{\frac{k^2}{(c^2 - k^2)}}$$

Lopputuloks on sama huolimatta siitä kuljetaanko alareunaa pitkin, joten merkitseväksi tekijäksi jää se kumpaa reunaa kulkeminen tulee halvemmaksi. Mikäli $f < b$ niin käytetään oikeaa reunaa ja lasketaan polun kustannus arvolla $k = f$. Jos taas $b < f$ niin käytetään alareunaa jolloin $k = b$ ja $y^* = 1 - x^*$. Täten algoritmi halvimman polun laskemiseen solmusta s mihin tahansa pisteeseen kaarelle, joka sijaitsee vierekkäisten naapurien s_a ja s_b välissä laskemiseen on seuraava:

```

ComputeCost( $s, s_a, s_b$ )
  if ( $s_a$  on solmun  $s$  diagonaalinaapuri)
     $s_1 = s_b$ ;
     $s_2 = s_a$ ;
  else
     $s_1 = s_a$ ;
     $s_2 = s_b$ ;

   $c$  on kustannus ruudulle, jonka kulmat ovat  $s, s_1, s_2$ ;
   $b$  on kustannus ruudulle, jonka kulmat ovat  $s, s_1$ , mutta ei  $s_2$ ;

```

```

if (min(c, b) = ∞)
    vs = ∞;
else if (g(s1) ≤ g(s2))
    vs = min(c, b) + g(s1);
else
    f = g(s1) - g(s2);
    if (f ≤ b)
        if (c ≤ f)
            vs = c√2 + g(s2);
        else
            y = min( $\frac{f}{\sqrt{c^2 - f^2}}$ , 1);
            vs = c√(1 + y2) + f(1 - y) + g(s2);
    else
        if (c ≤ b)
            vs = c√2 + g(s2);
        else
            x = 1 - min( $\frac{b}{\sqrt{c^2 - b^2}}$ , 1);
            vs = c√(1 + (1 - x)2) + bx + g(s2);
return vs;

```

3.3 Field D*

Algoritmi on optimoimaton esimerkki Field D*:in toteutuksesta [FS07], joka pohjautuu aikaisempaan D* Lite-algoritmiin [KL02]. Sen tarkoituksena on koota ylempänä esitellyn interpoloinnin avulla lasketut kustannukset yhteen ja muodostaa edullisin reitti kahden pisteen välillä. Algoritmi on toteutettu siten, että se ottaa huomioon muutokset ympäristössä, joita voi syntyä esimerkiksi sään muuttumisen seurauksena.

```

key(s)
    return [min(g(s), rhs(s)) + h(sstart, s); min(g(s), rhs(s))];

```

```

UpdateState(s)
    if solmussa s ei ole vielä kayty
        g(s) = ∞;
    if (s ≠ sgoal)
        rhs(s) = min(s', s'') ∈ connbrs(s) ComputeCost(s, s', s'');
    if (s ∈ OPEN)
        OPEN.remove(s);
    if (g(s) ≠ rhs(s))

```

```

OPEN.insert(key(s) : s)

ComputeShortestPath()
while (mins ∈ OPEN (key(s)) < key(sstart) || rhs(sstart) ≠ g(sstart))
    OPEN.remove(smallest(s));
    if (g(s) > rhs(s))
        g(s) = rhs(s);
        for all s' ∈ nrb(s) UpdateState(s');
    else
        g(s) = ∞;
        for all s' ∈ nbs(s) UpdateState(s');

Main()
g(sstart) = rhs(sstart) = ∞;
g(sgoal) = ∞;
OPEN.insert(key(sgoal) : sgoal)
while true
    ComputeShortestPath();
    Odota muutoksia ruutujen kustannusarvioissa
    for x in muuttuneet_ruudut
        for s in x
            UpdateState(s);

```

Pseudokoodissa $connbrs(s)$ on joukko solmun s perättäisiä naapuripareja: $(s_1, s_2), (s_2, s_3), (s_3, s_4), (s_4, s_5), (s_5, s_6), (s_6, s_7), (s_7, s_8), (s_8, s_1)$. Tämän lisäksi $g(s)$ on solmun s kustannusarvio, $rhs(s)$ kertoo arvion solmun s kustannuksesta yhden askeleen päästä, $OPEN$ toimii prioriteettijonona nousevassa järjestyksessä solmuille, joille $g(s) \neq rhs(s)$. $h(s_{start}, s)$ on heuristinen arvio kustannuksesta s_{start} solmusta solmuun s .

4 Visuaalinen odometria

Yksi mönkijöiden haasteellisimmista tehtävistä on jatkuvasti ylläpitää tietoa omasta paikasta ja asennosta. Suunnitteluvaiheessa tavoitteeksi asetettiin maksimissaan kymmenen prosentin virhemarginaali sadan metrin matkalla. Tehtävää varten mönkijöihin on sijoitettu inertian mittaussyksikkö, joka yhdessä rengasodometrian kanssa pyrkii päättämään kuinka pitkän matkan mönkijä on liikkunut ja missä asennossa se kullakin hetkellä on. Tämä menetelmä toimii hyvin tasaisella sekä hyvälaatuisella maastolla saavuttaen

sille asetetun tavoitteen.

Ongelmaksi muodostuvat kuitenkin tilanteet, joissa maaston pito pienenee huomattavasti, kuten esimerkiksi hiekka-aavikolla. Myös kraatterien kaltaiset kaltevat alueet tuottivat hankaluuksia inertian mittaussyksikölle ylläpitää tietoa mönkijän paikasta. Näissä tilanteissa avuksi otetaan visuaalinen odometria, jossa kahdesta eri hetkenä otetusta 256x256 stereokuvaparista tunnistetaan ympäristön piirteitä ja pyritään havaittujen erojen avulla arvioimaan mönkijälle tarkemmat arvot tämän kuudelle vapausasteelle. Tämä ominaisuus kuitenkin hidastaa mönkijän liikkumista yhtä suuruusluokkaa pienemmäksi, joten se kytketään päälle ainoastaan tarvittaessa. [CMM05]

4.1 Algoritmi

Tarkoituksena on siis löytää kuvaparista sellaiset piirteet, jotka on mahdollista löytää myös lyhyen matkan jälkeen otetusta uudesta kuvaparista. Tämä mahdollistaa melko tarkan arvion tekemisen siitä kuinka paljon kuvan ottaja on liikkunut kuvien ottamisen välillä ja liikkeen suunta saadaan myös selville. Algoritmin lähtökohtana on tilastollinen menetelmä nimeltä suurimman uskottavuuden estimointi. Ensimmäisen tämänkaltaista paikantunnistusmahdollisuutta tutki Larry Matthies vuonna 1986 ja samaan työhön perustuu myös Mars-mönkijöissä käytetty algoritmi [MS87].

Menetelmä voidaan jakaa karkeasti neljään osaan, jotka suoritetaan esitellyssä järjestyksessä. Niissä sovelletaan niin digitaalista signaalinkäsittelyä kuin tilastollisia menetelmiä.

4.1.1 Piirteiden tunnistus

Ensimmäisessä vaiheessa tarkoitus on etsiä kuvaparista selkeitä piirteitä, joiden voidaan olettaa löytyvän maastosta liikkumisen jälkeen. Mönkijöiden tapauksessa on käytetty konenäön osalta tunnettua kulmien tunnistusta, jossa kuvien pikseleille annetaan kiintoisuusarvo ja korkeimman arvon saaneet valitaan kuvien kannalta kiinnostaviksi piirteiksi. On myös toivottavaa, että kiinnostavia piirteitä löytyy riittävän monta, jotta ne kattaisivat tarpeeksi ison alueen kuvasta. Tämä auttaa varmistamaan sen, että kuvapareista voidaan mahdollisimman suurella todennäköisyydellä tunnistaa samat

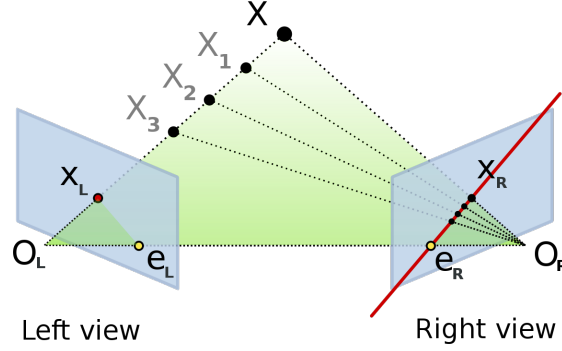
kohteet.[CMM05]

4.1.2 Piirreperusteinen syvyyden estimointi stereokuvia käyttäen

Tämän vaiheen ymmärtämisen osalta oleellista on ensin perehtyä stereokuvaparin sovittukseen (eng. stereo matching). Useille orgaanisille olennoille ympäristön hahmottaminen perustuu laajalti syvyysnäön käyttöön ja aivot prosessoivat tätä dataa suhteellisen vaivattomasti, jotta voisimme reagoida asioihin oikealla tavalla. Konenäön kannalta tämä on kuitenkin muodostunut ongelmaksi ja sen ratkaisemiseksi on kehitelty menetelmiä kuten stereokuvaparin sovittaminen. Tarkoituksena on luoda kolmiulotteinen rekonstruktio useasta eri kuvasta, jotka on otettu samasta kohteesta, mutta eri kuvakulmista. Tämä toteutetaan siten, että kuvista pyritään löytämään samoja asioita kuvaavat pikselit ja laskemaan niiden etäisyys eri kuvien välillä, jolloin voidaan luoda syvyysarvioita perustuen kameroiden sijaintiin. Suotuisa lopputulos on tiheä syvyyskartta, jossa kuvien jokaiselle pikselille on arvioitu tarkka syvyysarvo kuvaamaan pikselin paikkaa kolmiulotteisessa avaruudessa.[Hon10]

Toinen vaihe siis käyttää yllä esiteltyä menetelmää piirteiden sijainnin laskemiseen. Kameroiden hyvästä kalibroinnista johtuen sovittaminen tehdään epipolaarisella linjalla käyttäen muutaman pikselin kompensatiopuskuria linjan ylä- ja alapuolella. Parhaan sovituksen saamiseksi kuvapariin sovelletaan Hans Moravecin väitöskirjassaan esittelemää pseudo-normalisoitua korrelaatiota, joka ottaa huomioon esimerkiksi vaihtuvat valaistusolosuhteet[Mor80]. Kolmiulotteinen malli luodaan, jotta voitaisiin varmistua myöhemmin otetun kuvaparin piirteiden vastaavan jo valittuja piirteitä. Lopuksi varsinainen sijainti saadaan tutkimalla niitä pisteitä, joissa molemmista kameroista lähtevät säteet leikkaavat yhdessä piirteiden kanssa. Erinäisistä tekijöistä johtuen säteet eivät silti välttämättä kohtaa ja niiden välistä etäisyyttä käytetään sovituksen hyvyysarvona, missä pienempi etäisyys kuvaa parempaa sovitusta.[CMM05]

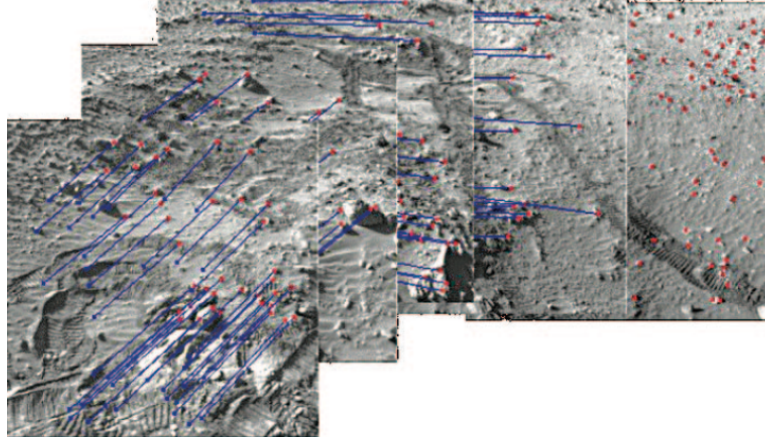
Kuva 5: Vasemmasta kamerasta lähtevä suora $O_L - X$ näkyy oikealle kameralle epipolaarisena linjana $e_R - x_R$. (Kuva: Arne Nordmann, Lisenssi: GFDL)



4.1.3 Piirteiden seuraaminen

Mönkijän liikuttua noin 75 senttimetrin matkan otetaan toinen kuvapari, jonka kuvien päälle heijastetaan aikaisemmin valitut kiinnostavat piirteet rengasodometrian perusteella. Korrelaatiopohjaisella haulla samat piirteet etsitään uusista kaksiulotteisista kuvista. Nyt uudesta kuvaparista löydettyt halutut piirteet sijoitetaan kolmiulotteiseen malliin edellisen vaiheen tapaan, mutta tällä kertaa sovittaminen on huomattavasti nopeampaa, sillä piirteiden sijainti tiedetään jo edellisen kuvaparin perusteella. Mikäli joidenkin piirteiden sijainti ensimmäisessä kuvaparissa eroaa liikaa toisesta kuvaparista lasketusta sijainnista niin piirteitä ei käytetä enää tulevissa laskuissa.[CMM05]

Kuva 6: Kuvaparien välinen piirteiden seuraaminen Spiritin näkökulmasta. (Kuva: NASA / [CMM05])



4.1.4 Liikkeen luotettava arviointi

Mikäli rengasodometriasta saatu tieto liikutusta matkasta pitää paikkaansa niin molempien kuvaparien sovittamalla luodussa kolmiulotteisessa mallissa piirteiden sijainnit pysyvät ennaltamäärätyn virhemarginaalin sisällä eikä jatkotoimenpiteitä täten tarvita vaan mönkijä pystyy informaation avulla päivittämään sijaintinsa kartalla.

Visuaalisesta odometriasta on kuitenkin eniten hyötyä juuri silloin kun muilla tavoin ei voida saada luotettavaa sijainnista kertovaa tietoa. Tämä havaitaan siten, että tunnistettujen piirteiden sijainti eroaa mallissa odotetusta ja eron perusteella määritellään mönkijän todellinen liike kuvaparien ottamisen välissä.

Prosessi on kaksivaiheinen, joista ensimmäisessä luodaan karkea arvio kuvaparien väliselle liikkeelle käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää. Tähän löytyy nopea sekä luotettava suljetun muodon ratkaisu. Helpon laskettavuutensa, mutta hitaampia menetelmiä epätarkemman arvion vuoksi ensimmäisellä menetelmällä pyritään ainoastaan poistamaan poikkeavat havainnot, jolloin toinen vaihe voidaan suorittaa nopeammin. Jäljelle jäänyttä joukkoa käytetään toisessa vaiheessa tarkempaan arvioon kuljetun liikeradan laskemiselle. Epätoivotut piirteet poistetaan seuraavalla tavalla:

1. Valitaan satunnaisesti pieni määrä piirteitä ja lasketaan niiden avulla

kuvaparien välinen liike soveltaen pienimmän neliösumman menetelmää.

2. Kaikki aikaisemmissa vaiheissa löydetty piirteet heijastetaan valittujen pisteiden kanssa samaan kuvaan käyttäen hyväksi ensimmäisessä kohdassa saatua arviota liikeradasta. Jokainen satunnaisesti valittu piirre, joka osuu riittävän lähelle tätä vastaavaa heijastetta saa yhden pisteen.
3. Kahta ensimmäistä vaihetta iteroidaan haluttu määrä ja lopuksi valitaan se piirre, joka on saanut eniten pisteitä. Tätä kolmivaiheista algoritmia voidaan soveltaa kunnes saadaan tarvittava määrä piirteitä, jotka vastasivat karkeaa arviota kuljetusta liikeradasta.

Nyt prosessi on valmis tekemään tarkan arvion käyttäen tilastotieteellistä menetelmää nimeltä suurimman uskottavuuden estimointi. Arvion tekeminen tapahtuu seuraavalla tavalla:

Olkoon P_{pj} ja P_{cj} mönkijän sijainti ennen ja jälkeen liikkeen. Jolloin

$$P_{cj} = RP_{pj} + T + e_j,$$

missä R ja T ovat mönkijän rotaatio sekä translaatio ja e_j on yhdistetty virhe piirteiden havaitussa sijainnissa. Tässä arviossa kolme akselin rotaatiota θ_R ja translaatio T ovat suoraan määriteltä minimoimalla eksponenttien summa:

$$\sum r_j^T W_j r_j$$

$$r_j = P_{cj} - RP_{pj} - T,$$

missä W_j on $e_j : n$ kovarianssi-käänteismatriisi. Tämän epälineaarisen ongelman minimointi on toteutettu linearisoimalla sekä iteratiivisella prosessilla. Tarkan algoritmista tekee se, että suurimman uskottavuuden estimoinnissa voidaan eliminoida rotaatiomatriisin arvioinnista syntyvä virhe laskemalla arvio akselien rotaatioille θ_R suoraan, toisin kuin pienimmän neliösumman menetelmässä. Lisäksi lopullinen arvio pitää sisällään myös tiedon kaikista rengasodometriasta saaduista virheellisistä arvioista, jonka avulla suurimman uskottavuuden estimointi on erittäin tarkka menetelmä sijainnin laskemiseksi.

[CMM05]

4.2 Algoritmin validointi Maan pinnalla

Ennen varsinaista käyttöönottoa visuaalista odometriaa kokeiltiin useilla erilaisilla alustoilla kuten esimerkiksi NASAn Jet Propulsion Laboratoryn Rocky 8 -mönkijällä. Kahdella vaarojen havaitsemiseen tarkoitettulla kameraparilla varustettuna laite muistuttaa Marsiin lähetettyjä Spiritiä sekä Opportunityä. Kokeiluun käytetty Johnson Valley tarjoaa mäkisen sekä hienon hiekan vuoksi liukkaan maaperän, jonka tarkoituksena on saada rengasodometria tuottamaan vääriä tuloksia, jolloin konenäön avulla tehdyn paikannuksen hyödyt tulevat esiin. Rockyn todellisen liikkeen sekä asennon mittaamiseen otettiin avuksi takymetri, jonka virhemarginaali pysyy alle kahdessa millimetristä liikutulla matkalla sekä alle 0.2 asteessa asennon suhteen. Visuaalinen odometria mittasi mönkijän kulkeman matkan reilusti alle tavoitteeksi asetetun 10% virhemarginaalin ja virhettä kertyi alle 1.5%. Virhe asennon suhteen pysyi kaikissa testeissä alle viidessä asteessa.

Lähemmäksi Mars-mönkijöiden todellista laitekokoonpanoa päästiin sisätiloissa ajettulla MER Surface System Testbed Lite -järjestelmällä. Ainoa merkittävä ero on lähinnä vaarojen havaitsemiseen tarkoitettussa kameraparissa, jonka kuvissa testimönkijän näkökenttä on 120 astetta verrattuna Mars-mönkijöiden 45 asteeseen. Laitteella ajettiin seitsemän kertaa 35 senttimetrin matka ja visuaalisen odometrian sekä rengasodometrian virheet kirjattiin ylös jokaisella pysähtymiskerralla. Koko matkan ajan konenäkö pysyi pitämään virhemarginaalin alle yhdessä prosentissa, kun taas renkaista saadut mittaukset vaihtelivat luotettavuudessaan, mutta matkan kasvaessa virhemarginaali pääasiassa kasvoi ja ylitti maksimiksi asetetun 10% arvon. [CMM05]

4.3 Visuaalinen odometria Marsin pinnalla

Spirit ja Opportunity kuvaavat ympäristöään näiden mastoihin kiinnitetyillä NAVCAM-kamerapareilla ja kameroiden tuottamat kuvaparit annetaan visuaalisen odometrian käsiteltäväksi. Paras tulos saadaan kun liike tapahtuu kerrallaan enintään 75 senttimetrin askeleissa ja kuvien päällekkäisyys on vähintään 60 prosenttia. Liikkeen aikana rata saa kaareutua maksimissaan 18 astetta. Yhden askeleen vaatima laskenta-aika vaihtelee kahdesta kolmeen

minuuttia visuaalisen odometrian ollessa käytössä.

Marsin pinta asettaa toisinaan myös sellaisia haasteita, joissa tämä menetelmä ei tuota hyväksyttävää tulosta. Laajat hiekka-aavikot saattavat sisältää liian vähän konkreettisia piirteitä, jotta niitä olisi tarpeeksi algoritmia varten. Tämän lisäksi edellä mainittujen optimaalisten liikeratojen rikkominen tuotti algoritmille hankaluuksia. Vääriä, mutta mönkijän visuaalisen odometrian oikeaksi mieltämiä ratkaisuja syntyi kahden ajon aikana alkuperäisen konfiguraation takia, jossa kuvista löydettyjen piirteiden ei tarvinnut kattaa riittävän isoa aluetta. Muuttamalla vaadittavasta kattavuudesta kertovaa parametria ongelma korjattiin. Ainoa jatkuvaan tarkkailuun asetettu ongelmakohta ilmeni Opportunity 235:en päivän kohdalla, kun liian piirteetön maasto keskitti visuaalisen odometrian huomion mönkijän omaan varjoon. Tämä tuotti täysin virheellisen tuloksen arvioon kuljetusta matkasta ja tapahtuman jälkeen ohjaajien on täytynyt ottaa mönkijöiden varjot huomioon antaessaan niille käskyn nojautua visuaaliseen odometriaan liikkumisen aikana.

Visuaalisen odometrian lisäämä autonomisen liikkumisen turvallisuus taas oli yksi selkeistä hyödyistä, joita mönkijöiden päivittäisessä operoinnissa havaittiin. Tämän lisäksi tarkempi liike mahdollisti kehittyneemmän kyvyn tehdä tieteellisiä havaintoja hankalassa maastossa esimerkiksi siten ettei ohjaajien tarvinnut varmistaa mönkijään kiinnitettyjen instrumenttien kohdentamista hitaasti välittyvän näköhavainnon perusteella.

Marsissa viettämästään 394:stä vuorokaudesta Opportunity nojautui visuaaliseen odometriaan 75:nä päivänä. Ajopäiviä mönkijälle kertyi 172, joten algoritmia oli käytössä lähes joka toisena päivänä. Spiritin vastaavat luvut olivat 414 Marsin vuorokautta, joista ajopäiviä oli 184 ja visuaalista odometriaa käytettiin 52:nä päivänä. Yhteensä kuvapareja analysoitiin tuona aikana 1 654 kappaletta, joista 1 418 pystyi arvioimaan mönkijän sijainnin sekä asennon riittävän tarkasti. [CMM05]

Huolimatta yllä mainituista ongelmista visuaalinen odometria on yksi mönkijöiden tärkeimmistä työkaluista turvallisen ja itsenäisen liikkumisen toteuttamisessa Marsin pinnalla. Havaituista hyödyistä kertoo myös se, että algoritmi on käytössä vuonna 2011 Marsiin lähetetyssä Curiosity-mönkijässä [GCV⁺12].

5 Mönkijöiden kehittyminen tulevaisuudessa

6 Yhteenveto

Lähteet

- [CMM05] Yang Cheng, Mark Maimone, and Larry Matthies. Visual odometry on the mars exploration rovers. In *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 903–910. IEEE, 2005.
- [CR09] Joseph Carsten and Arturo Rankin. Global planning on the mars exploration rovers: Software integration and surface testing. *Journal of Field Robotics*, 2009.
- [FS07] Dave Ferguson and Anthony Stentz. Field d*: An interpolation-based path planner and replanner. In *Robotics Research*, pages 239–253. Springer, 2007.
- [GCV⁺12] John P Grotzinger, Joy Crisp, Ashwin R Vasavada, Robert C Anderson, Charles J Baker, Robert Barry, David F Blake, Pamela Conrad, Kenneth S Edgett, Bobak Ferdowski, et al. Mars science laboratory mission and science investigation. *Space Science Reviews*, 170(1-4):5–56, 2012.
- [Hon10] Wenxian Hong. *A study of fast, robust stereo-matching algorithms*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [HV04] Brian D Harrington and Chris Voorhees. The challenges of designing the rocker-bogie suspension for the mars exploration rover. In *37th Aerospace Mechanisms Symposium, May 19-21, 2004, Johnson Space Center, Houston, Texas*. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2004, 2004.
- [KL02] Sven Koenig and Maxim Likhachev. D* lite. In *AAAI/IAAI*, pages 476–483, 2002.

- [LBH⁺06] Randel A Lindemann, Donald B Bickler, Brian D Harrington, Gary M Ortiz, and Christopher J Voothees. Mars exploration rover mobility development. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 13(2):19–26, 2006.
- [Mor80] Hans P Moravec. Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover. Technical report, DTIC Document, 1980.
- [MS87] Larry Matthies and Steven A Shafer. Error modeling in stereo navigation. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(3):239–248, 1987.
- [NAS14a] NASA. The microscopic imager, December 2014.
- [NAS14b] NASA. Rock abrasion tool (rat), December 2014.
- [NAS14c] NASA. The rover’s "arm", December 2014.
- [NAS14d] NASA. The rover’s "eyes"and other "senses", December 2014.
- [NAS14e] NASA. Spacecraft: Surface operations: Instruments, December 2014.
- [Ste95] Anthony Stentz. The focussed d^* algorithm for real-time replanning. In *IJCAI*, volume 95, pages 1652–1659, 1995.