

Reportage fra en Mars-mission

Bjørn Toldbod & Uffe Thomas Jankvist

Institut for Matematik og Fysik
Roskilde Universitetscenter
Box 260, 4000 Roskilde, DK
bjto@ruc.dk, utj@ruc.dk

Den 4. januar 2004 gik Mars Exploration Rover A, med tilnavnet *Spirit*, ind i Mars' atmosfære. Det 827 kg tunge fartøj havde på dette tidspunkt en fart på 19 300 km/h. I løbet af de næste 4 minutter blev farten ved mødet mellem atmosfæren og fartøjets frontskal reduceret til 1 600 km/h. Fartøjets faldskærm blev på dette tidspunkt foldet ud, og hastigheden faldt hurtigt til 300 km/h. Hver gang fartøjet udførte en ny handling, blev en tone via satellit transmitteret til Jorden som tegn på succes. 100 meter over Mars' overflade affyredes fartøjets bremsesraketter, og til sidst udfoldede de kæmpemæssige airbags sig. Det indhyllede fartøj ramte planetens overflade med en hastighed på cirka 50 km/h. Derefter hoppede og rullede airbagkuglen omkring en kilometer henover Mars' overflade, ligesom Mars Pathfinder havde gjort det syv år tidligere. Da landingmodulet stoppede sin fremfærd blev dets airbags afmonteret, dets kronblade udfoldet og den igennem seks måneder indkapslede rover, Spirit, kunne endelig folde sine solpaneler ud. Tre timer senere transmitterede Spirit sit første billede af Gusev-krateret til Jorden. Den 15. januar forlod Spirit sit landingsmodul og kørte ud på Mars' overflade. 10 dage senere, den 25. januar gentog hele scenariet sig for Mars Exploration Rover B, også kaldet *Opportunity*^{*}.

De to roveres landinger blev fulgt med stor interesse. Ikke mindst på NASAs¹ Jet Propulsion Laboratory² (JPL), hvor der herskede en euforisk stemning og blev grædt et utal af glædestårer, da det stod klart, at roverne havde klaret landingen

^{*}Informationerne stammer fra <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=2003-027A> og <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=2003-032A>

¹National Aeronautics and Space Administration.

²Jet Propulsion Laboratory hører under California Institute of Technology (CalTech) og ligger i Pasadena, Californien.

og var fuldt ud operationsdygtige. Euforien skyldtes, at *Mars Exploration Rover*-missionen (MER) på det tidspunkt havde været en del af arbejdet på JPL igennem en årrække. Et arbejde med at planlægge missionen ned til mindste detalje og med at konstruere roverne og alt deres udstyr. Et arbejde af enormt omfang. Et arbejde, der da MER-missionen var på sit højeste, beskæftigede over tusind folk; ingeniører, radiofolk, geologer, fysikere, dataloger samt matematikere og mange, mange andre videnskabelige medarbejdere. Denne »reportage« handler om den matematik, der var involveret i disse folks arbejde.

Baggrund

I forbindelse med vores fælles speciale³ på matematikoverbygningen ved Roskilde Universitetscenter befandt vi os i en uge i marts 2005 på NASAs Jet Propulsion Laboratory. Formålet med vores ophold var at blive klogere på det arbejde, som foregår på JPL, i særdeleshed det matematiske arbejde. Vores tilgang var i realiteten delvist humanistisk af natur – vi ville forsøge at opnå et indblik i de ansattes personlige motivation for at arbejde ved JPL samt arbejdsforholdene på institutionen. Denne »menneskelige tilgang« ønskede vi at kombinere med en mere »matematisk tilgang« i form af en selektiv undersøgelse af nogle af de matematiske problemstillinger, som skal behandles under en mission i rummet. Den overordnede ide var at basere undersøgelsen på interviews med JPLs ansatte – ikke mindst på grund af den manglende litteratur på området.



Figur 1: Jet Propulsion Laboratory i Pasadena, Californien. Til venstre: JPL set fra oven. http://ipac.jpl.nasa.gov/media_images/jpl_small.jpg Til højre: En af JPLs hovedbygninger. <http://www2.jpl.nasa.gov/files//images/browse/jpl18161ac.gif>

Drivkraften bag undersøgelsen var et ønske om at afdække i hvilken grad de matematiske problemstillinger blev løst gennem nyudvikling af matematik eller gennem allerede færdigudviklede løsninger. Med andre ord var vi interesserede i at undersøge institutionens bidrag til matematisk grundforskning. Interessen for

³Specialerapporten består af teksterne [3], [4] og [5] og kan rekvireres via IMFUFAs hjemmeside <http://mmf.ruc.dk/> eller kan findes som IMFUFA-tekst nr. 449 på <http://mmf.ruc.dk/imfufatekster/index.htm>

JPL skyldtes en forestilling om, at de ekstreme forhold, der gør sig gældende for en rummission, i en vis forstand ville smitte af på det matematiske arbejde i form af ekstreme krav til den involerede matematik. Vi forestillede os altså, at et sted som JPL ville udgøre et interessant grundlag for en undersøgelse af matematisk grundforskning såvel som matematiske anvendelser.

Forskningsinstitution *Jet Propulsion Laboratory* er placeret et afsidesliggende sted på vej op i bjergene, omgivet af skov lidt nord for Los Angeles' forstad Pasadena. Efter en halv times kørsel fra downtown Pasadena når man frem til områdets indkørsel, hvor man hver dag mødes af uniformerede vagter, som undersøger bilen og spørger, om man har en konkret aftale på stedet. Som udefra kommende får man det førstehåndsindtryk, at indkørslen er en indgang til en »hemmelighedsfuld verden«. Da vi ankom første dag blev vi hilst velkommen af en dame i receptionen ved navn »Bobby«. Bobby informerede os om sikkerhedsprocedurerne på stedet og telefonerede dernæst til dr. William Folkner for at meddele vores ankomst. Folkner dukkede op efter et par minutter og tog os med rundt på JPLs arealer. I løbet af den uge, vi tilbragte på stedet, mødte vi en håndfuld af JPLs ansatte, som vi i det følgende skal forsøge at give et indtryk af.

JPLs mennesker

William Folkner var den person på stedet, vi havde mest kontakt med, og dermed også den person vi havde flest muligheder for at interviewe.

Vi talte med ham om de generelle betingelser for at arbejde med en rummission og om typiske problemstillinger, der skal løses, eksempelvis beregning af banekurver for fartøjerne. Desuden fik vi lejlighed til at spørge ham om hans karriere og om hans billede af de mennesker, der arbejder ved JPL. Folkner fortalte os, at han selv havde taget en ph.d. inden for fysik fra University of Maryland. Derefter besluttede han at søge ansættelse ved JPL for at være en del af den planetare udforskning. Han har været på stedet siden 1988. Vi spurgte ham, om han mente, at hans vej til JPL og efterfølgende karriere på stedet var typisk.



Figur 2: Rundvisning på JPL. Til venstre: Uffe og dr. Albert Haldemann som viste os rundt på JPL. Til højre: På besøg på JPLs museum for tidligere missioner sammen med dr. William Folkner.

Most of the people I know has been here a long time or tend to be here a long time. There aren't many people who come here who just want to be here a year or two and then go away again. People who want to do space work tend to *want* to do space work. I think this is the best place in the world to do space work. The people here are all very, very good. They are all very dedicated and they want to make these things fly. [1]

Ifølge Folkner skulle den stærkeste motivation for mange af JPLs ansatte være fascinationen af selve missionerne. Dette forhold fik vi bekræftet adskillige gange under opholdet. Mark Maimone, som var involveret i udviklingen af rovernes styring, fortalte at han ville blive på JPL, så længe det var muligt. Han er uddannet ingeniør og færdiggjorde en ph.d. i Pittsburgh, Pennsylvania, efterfulgt af en post doc. inden for *space robotics*, inden han fik en stilling ved JPL i 1998. Om sin baggrund for at tage arbejde ved JPL forklarede han:

When I was a kid I saw the Viking missions on Mars and I thought that would be pretty neat, hunched over the terminal looking at these pictures that nobody else would see for a year before it got published. [9]

Om de personlige bevæggrunde for at komme til JPL talte vi også med Aaron Kiely og Matthew Klimesh, som er hovedpersonerne bag ICER – den billedkomprimeringsalgoritme, som bliver benyttet af roverne til transmission af billeder. Begge havde studeret i Michigan og havde ph.d. grader bag sig. De var kommet til JPL kort tid efter færdiggørelse af deres studier og ønskede at blive der [7] [8].

JPLs forskere synes at være folk med det højeste uddannelsesniveau, som kommer til JPL næsten umiddelbart efter afslutningen af deres universitetsstudie. De er drevet af lysten til at arbejde med den planetare udforskning. For vores undersøgelse var det interessant, at ingen af dem svarede, at de var på JPL, fordi det gav mulighed for at arbejde med nye matematiske problemstillinger.



Figur 3: På rundvisning ved JPLs »sandkasse«, hvor MER-roverne testkøres. Til venstre: Bjørn Toldbod foran sandkassen. Til højre: Kopi af MER-rover, som anvendes til testkørsler på JPL.

Arbejdet på JPL

En af de første personer, som vi talte med om det matematiske arbejdet, var Jacob Matijevic, som er uddannet matematiker og har været på JPL i en årrække. Vi talte især med ham om det modelleringsarbejde, der foregår inden selve missionen igangsættes.

En mission som MER handler i høj grad om at være i stand til at forudsige diverse begivenheder. Når fartøjet flyver oppe i rummet, er det umuligt at foretage justeringer, som kræver mere end et radiosignal, og alting skal derfor fungere som forventet.

Som eksempel kan nævnes Mars-miljøets påvirkning af instrumenterne om bord på Spirit og Opportunity. Man er nødt til at have meget præcis viden om, hvordan varme og kulde fordeler sig i roverens indre og påvirker instrumenterne. For at opnå en sådan viden bygges virtuelle modeller af roverne i software, som kan simulere termiske forhold. Sådanne termiske modeller er typisk baseret på en række differentiaalligninger, som løses i programmerne. Arbejdet for den ansatte på JPL består i at bygge den virtuelle model af roveren. Den konkrete løsningsmetode, som programmet implementerer er underordnet så længe den virker og ikke er alt for langsommelig.

For at kunne forudsige den konkrete påvirkning af instrumenterne i de nævnte modeller, er man ifølge Matijevic [10] også nødt til at have modeller for, hvordan miljøet afhænger af årstiderne på Mars. Sådanne modeller baseres dels på data fra de forskellige orbitere og dels på konkrete målinger foretaget på overfladen. Korrektheden af sidstnævnte målinger afhænger i høj grad af, hvor god beskrivelsen af instrumenternes opførsel i Mars-miljøet er, og kan altså ikke garanteres. Man kan dog sammenligne sine orbiter-data med de konkrete målinger og på denne måde modificere sine modeller, så disse langsomt bliver bedre og bedre. Alt dette foregår i software. Med hensyn til modellerne af årstidernes påvirkning af Mars-miljøet er det nok ikke urimeligt at sammenligne JPLs arbejde med arbejde, der foretages på et meteorologisk institut. Matijevic fortalte følgende om dette arbejde:

When I first arrived here over twenty years ago there were still efforts to hand-implement certain mathematical models for certain applications. And there were specialist applications here for specialists in the applied mathematical sciences who worked here to make those applications possible. But over time much of that has been incorporated in fairly standard and available simulation and modelling packages – computer packages. Expansions have been introduced slowly over time to these packages and that’s basically how the engineers here do their job. Instead of going back to first principles they apply these tools ... the foundation theories are from the eighteenth century to a large degree.
[10]

Der foregår altså en masse arbejde, som involverer modellering og simulering, men alt dette foregår i softwarepakker. Det kunne give én grund til at tro, at der sidder matematikere på JPL og udvikler sådanne pakker, men Matijevic fortalte, at pakkerne for det meste stammer fra kommercielle firmaer.

Midt i ugen fik vi mulighed for at interviewe en af JPLs ingeniører, Miguel san Martin. Han fortalte med stor indlevelse om de udfordringer, som skal overvindes

når roverne skal orientere sig på Mars' overflade. som Martin fortalte os, at navigationen på overfladen er baseret på en velkendt teknik, som sømænd har brugt i årtusinder på Jorden – man kigger på Solen. Sammen med en gravitationsvektor, som kan måles af roveren, giver Solens position på himlen i store træk den information, der er nødvendig for at kunne orientere sig på overfladen. Den matematik, der er involveret, er forholdsvis simpel. som Martin fortalte, at stort set al den matematik, som indgår i hans arbejde er simpel af natur. Han sammenfattede det således:

So that's it. Not much. The most important is that you have millions of these little, simple things. And that's the trick; to make them all work, and talk to each other and make sure that no parameter is tightened too much or too little. The complexity of the space problem is keeping it simple. [11]

William Folkner, der var til stede under interviewet, kommenterede:

Well, you hit a lot of mathematics in your descriptions, right, because you need to know the positions of the axes of Mars around the Sun as a function of time and you need to know what the orbits around the Sun and the Earth were. There is a lot of mathematics hidden in what you just said . . . We've worked all that out for us in the tables. So to know where the Sun is now, you just look it up. Somebody had to figure it out the first time. [11]

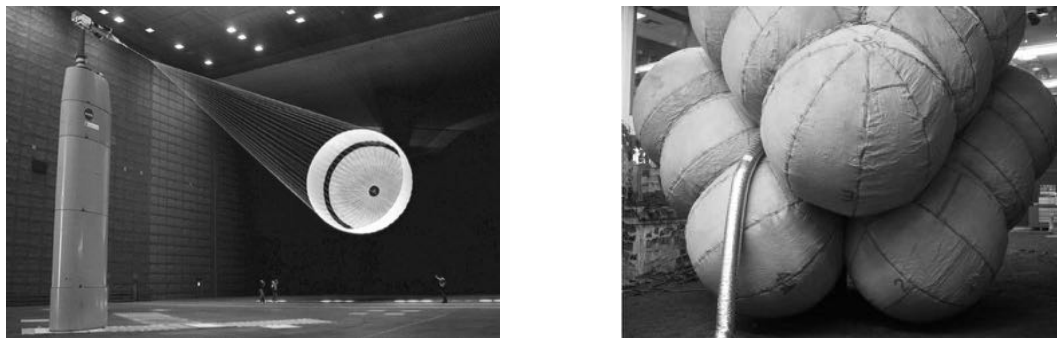
Matematikken er altså klart tilstede i det videnskabelige arbejde på JPL, men den forekommer til tider i form af informationer, som er en så integreret del af vores »dagligdags viden«, at dens matematiske indhold glemmes. Samtalen illustrerer i øvrigt, at ikke alle JPLs ansatte er så opmærksomme på disse matematiske forhold.

Arbejdets præmisser

Som omtalt i indledningen involverer et projekt som MER undertiden op imod tusind mennesker ad gangen. Et så omfangsrigt projekt kræver naturligvis en enorm mængde planlægning og ajourføring mellem forskellige afdelinger og arbejdsgrupper. Desuden kræves en utrolig høj pålidelighed af det arbejde, der udføres. En enkelt fejl i et stykke teknologi eller en algoritme kan få alvorlige konsekvenser og i værste tilfælde resultere i adskillige års spildt arbejde for mange hundrede mennesker. En stor del af det arbejde, der foregår på JPL, er derfor præget af omhyggelig udvikling og afprøvning. Jacob Matijevic fortalte følgende om arbejdet med rovernes faldskærme:

We did drop tests. We did wind tunnel tests with the parachutes. But even before this time it was through models of the profiles of these devices that we came up with things like what the entry angles would be, what sorts of release points should we be looking at, as well as designing the algorithm that checks for height above the surface and

finding out at which time to deploy the parachute and at which time to fire the rockets for slowing the descent. All of this was based on what we expected to be the environmental profile that the vehicle would see as it came down to the surface. So this was all done in simulation. [10]



Figur 4: Til venstre: Vindtunneltest af MER-landingsmodulets faldskærm. http://www.nasa.gov/centers/ames/images/content/79641main_picture_2.jpg
Til højre: MER-landingsmodulets airbags. http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA04999_modest.jpg

Pålidelighed er altafgørende for missionerne. Står man og skal vælge mellem to forskellige tilgange til en problemstilling, er man tilbøjelig til at vælge en velkendt, gennemprøvet løsning i stedet for en ny og muligvis mere effektiv løsning, som ikke har været forsøgt tidligere. Vores samtale med en af JPLs ledende kodningsteoretikere, Jon Hamkins, bekræftede dette for brugen af de fejlkorrigerende koder der anvendes til at korrigere for transmissionsfejl forårsaget af interferens på »linjen« mellem Mars og Jorden.

The process of flight qualification is very long actually ... and you know missions that are signing up for a very complicated space craft ... they are out to minimize risks so they want stuff that has been flown in previous missions, they don't want something new. It's kind of contrary to the spirit of exploration. They don't want risks even though we are confident that it works ... it is a risk to a mission if it hasn't flown before. [2]

Matematik og teknologi, som har været om bord på en tidligere mission, bliver ikke betragtet som nær så usikker og er derfor et mere attraktivt valg. Dette er et forhold som gør sig gældende i alle områder af missionen. Matijevic omtalte dette som »steady progress« [10]. Der foregår naturligvis en vis udvikling, men denne udvikling foregår langsomt, og de nye ideer, som bliver introduceret i missionerne vil for det meste være omkring ti år gamle ved opsendelsen, fordi de allerede skal fastlægges under planlægningen af missionen.

Omfanget af projektet betyder også, at de forskellige afdelingers arbejde *skal* færdiggøres til bestemte deadlines. Deadlines virker ikke overraskende som en hæmsko for udviklingen af nye ideer, da det er sværere at overholde deadlines, når man arbejder med opgaver hvis løsninger ikke altid er velkendte. Det er helt utænkeligt at gå igang med et stykke arbejde, hvis man ikke er sikker på, at der er tid til

at foretage tilstrækkelige afprøvninger af dette. William Folkner kommenterede, hvordan de konstante deadlines påvirker sammensætningen af folk, der arbejder på JPL:

There are five thousand people here. How many post docs are there? I don't know, maybe a hundred and fifty – something like that. We don't have a lot of graduate students and part of that is because almost everything we do here has to be done on a particular time scale. Very little of our budget is spent doing research where if we get the answer next year or the year after that, it doesn't matter. Everything has to be done on a schedule. So it is not a good training environment for graduate students. Graduate students here are not used much, because the people who could supervise them are busy doing other things. [1]

Udover de faste deadlines er der et andet forhold, som klart forstærker tendensen til at fravælge det nye og usikre: På JPL er man i nyere tid gået bort fra få store, dyre missioner, og drejet i retning af mange små, men billige missioner. Pathfinder-missionen fra 1996 havde således et samlet budget på kun 265 millioner dollars⁴, hvilket sammenlignet med Viking-missionernes budget på 8 milliarder dollars må betegnes som »low-cost«. MER-missionen har været dyrere end Pathfinder, men stadig ikke i nærheden af Viking-beløbet.

Kan man genbruge noget fra en tidligere mission, kan man spare store mængder af penge og tid, og de mange billige missioner må derfor nødvendigvis benytte en del genbrug fra mission til mission. Genbruget gælder i en vis forstand også de mennesker, som deltager i missionerne. Folkner fortalte:

A problem in doing the smaller missions is that you can only do them with reasonably experienced people, and because they are small you don't have the budget to have an experienced person train an inexperienced person. So JPL is getting older on the average, because we don't have a big mission to afford enough people to have senior and junior people. So JPL is short of junior people. That is not a problem yet, but in five years or ten years it will be a disaster. The management here knows that and is trying to deal with it but it is not often you fix problems until they occur. They are trying to get ahead of that, but it is a difficult thing. Because we are trying to do so many cheap missions we depend on experienced people and we are not budgeting training inexperienced people. It's probably true throughout NASA and the aerospace industry. [1]

Om matematikken i MER

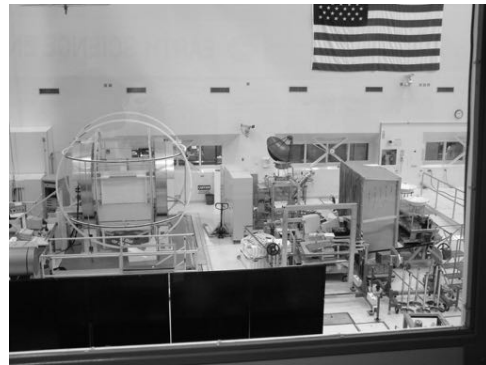
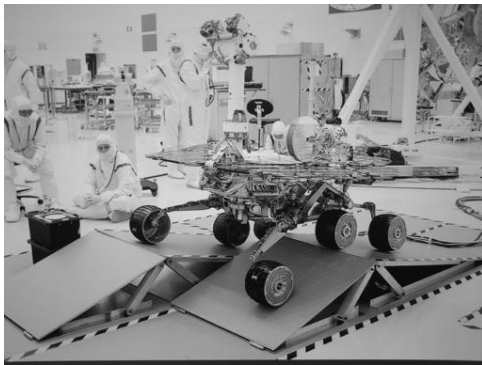
Med hensyn til konkrete matematiske problemstillinger i missioner, så antyder de beretninger, vi fik gennem interviews, en række fælles træk for problemstillingerne.

Miguel san Martin fortalte os om flere forskellige matematiske problemstillinger, som indgår i missionerne. Et problem, som altid er interessant for de planetare

⁴<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1996-068A>

missioner, er *Lost in Space* problemet. Problemet indgår som fast element i transitfasen, i hvilken størstedelen af rejsen fra Jorden til Mars foregår. Problemet består i at finde ud af, hvor i rummet man er ved at se på stjernerne. Hovedproblemet er således at identificere de stjerner, man ser på. Det viser sig, at denne identificering ikke er et trivielt problem. Man kan ikke identificere en stjerne alene ved dens lysstyrke eller placering relativt til andre uidentificerede stjerner. Man er nødt til at se på de mønstre, som stjernerne danner. Imidlertid kan man simplificere opgaven ved at se på Solen. san Martin fortalte:

People have been playing with variations of this since the '60s. Some versions are more clever than others. This one for instance cheated because we used the Sun. »I'm in three dimensions and I don't know where I am. By looking at the Sun I know two dimensions.« Without using the Sun, this problem is called the *Lost in Space* problem. [11]



Figur 5: På rundvisning på JPL. Til venstre: Billede af en test af MER-rover forud for opsendelsen. Til højre: Et af JPLs laboratorier.

Problemstillingen, der forekommer i MER, er altså en forsimplet udgave af *Lost in Space* problemet. Dette problem blev formuleret og løst allerede i tresserne, da rummissionerne begyndte. *Lost in Space* problemet kræver, at man foretager en del målinger fra rumfartøjet. Dette giver anledning til en ny problemstilling.

In the cruise we are spinning the spacecraft. We use conservation of angular momentum to keep our spacecraft from turning. The most sophisticated piece of software that we have onboard during that time is a Kalman filter. A Kalman filter is a statistical framework, or algorithm perhaps, to mix information from different sensors. So you have a dynamic model – in this case it's a simple rigid body, which you represent mathematically and then you have some sensors which measure where the Sun is. And you have a statistical noisy model. [11]

Kalmanfilteret gør det muligt at kombinere data fra forskellige sensorer. Data fra disse sensorer vil ofte være ufuldstændige, afhængige af måleudstyrets opførsel i den konkrete situation eller måske påvirket af støj. Kalmanfilteret giver et estimat af, hvordan målingerne ville have set ud uden alle disse forstyrrende elementer. san Martin kommenterede brugen af filtret:

You can come up with a sequential filter that allows you to optimally combine the information from three things; your dynamic model, your sensors and your star tracking into optimal information about your attitude [rumfartøjets position relativt til en referenceramme] and the inertial properties of your plant. So that is going on all the time. It's a well known aerospace industry. [11]

Kalmanfiltreringen udgør altså ikke et stykke matematik, der er udviklet på JPL til missionen, men er en del af et problem, der allerede var løst i tresserne.

Under vores interviews med William Folkner diskuterede vi blandt andet udfordringen i at bestemme den rette banekurve for rejsen. Mars-missionerne gør altid brug af den samme banekurve, som kaldes *Hohmann*-banekurven. For to legemer (Mars og Jorden), der kredser om et andet legeme (Solen) er Hohmann-banekurven den løsning på banekurveproblemet, som kræver den mindste energi ved opsendelsen. Fordi Mars' og Jordens bevægelser omkring Solen ikke ligger i samme plan, fås i praksis to løsninger (type 1 og 2), som kræver den samme energi. Vi spurgte Folkner, om banekurveproblemet er en standardøvelse:

Yes, for Mars it is a very standard exercise. For the other planets it tends to be more complicated because you'll trade flybys of other planets for angular momentum against the mission operations time ... For going to Mars it always comes down to: »Do you want to do type 1 or type 2?« [1]

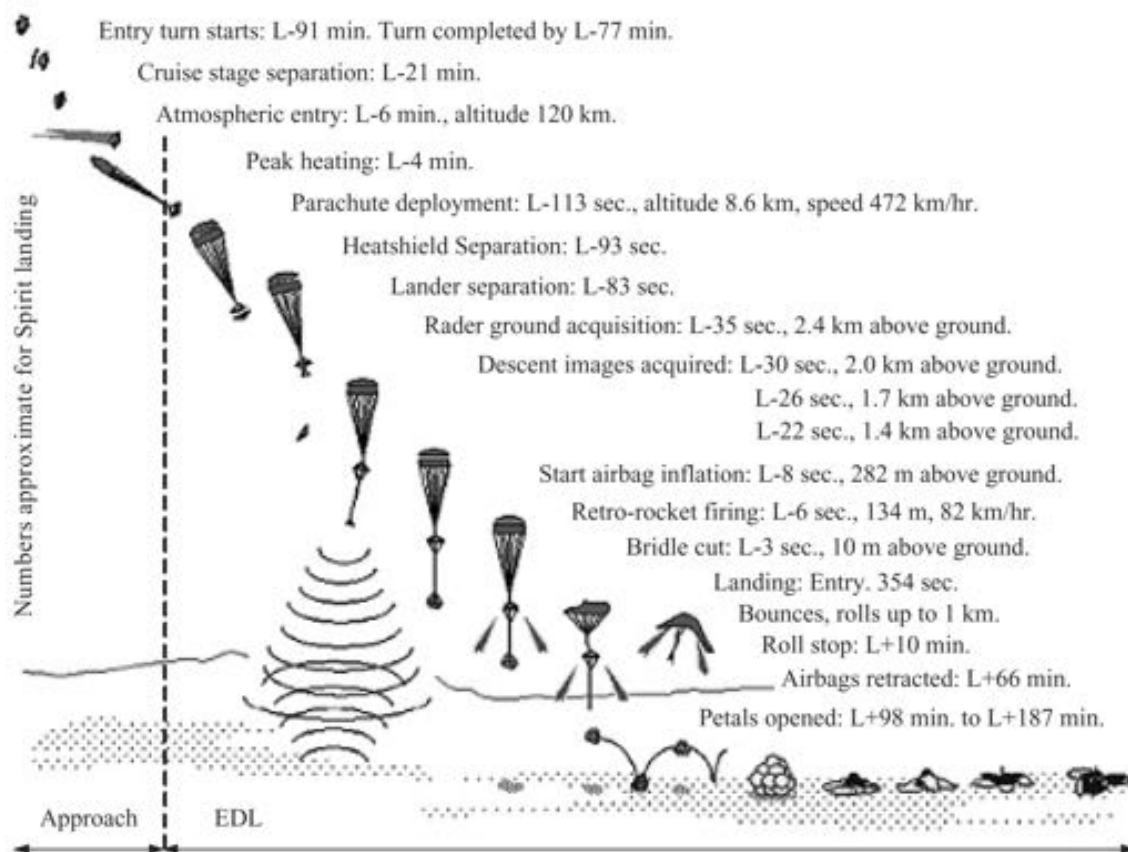
Hohmann-banekurven, som stammer fra 1925⁵ er endnu et eksempel på et matematisk problem, som allerede er løst, og som blot skal pilles ned fra hylden fra mission til mission.

De matematiske problemer og begreber, som vi har beskrevet ovenfor, er forholdsvist isolerede og afgrænsede. For at få et indtryk af en større sammenhængende teori af betydning for missionen, udspurgte vi blandt andre Jacob Matijevic om den *kontrolteori*, som ligger til grund for styringen af roverne. Han kunne dog afvise, at denne del af missionen gør brug af nyudviklet matematik:

Mainly what we're taking advantage of to at least create the driving pattern, is the fact that each of the individual six wheels is controllable at least for steering and so we can create in essence any kind of arc condition. Because of the individual control we can modulate the speed of the motor turns. That gives us a means for being able to accommodate surface interactions between the wheels and the terrain. The foundation is actually fairly simple. We're using in each case a simple proportional integral derivative; the control algorithm is very linear. [10]

Mere avanceret kontrolteori kunne muligvis opdages i *Entry-Descent-Landing*-fasen (se figur 6). I denne fase styrer fartøjet ind gennem atmosfæren og lander på planeten. Fasen indeholder en masse hændelser, hvis formål er at bremse fartøjet; landeren bremses først af en faldskærm, som udfoldes, mens fartøjet er på vej ned gennem atmosfæren. Herefter affyres bremses raketter, og til sidst pustes landerens

⁵Se eventuelt <http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er/seh/know2.html>



Figur 6: Ankomst, nedstigning og landing (Entry, Descent and Landing). [6]

airbags op. Når landeren er færdig med at hoppe henover planetens overflade lukkes luften ud af modulets airbags og dets tre kronblade åbnes. Når disse er åbne, folder roveren sine solpaneler ud. I hver af disse trin, som er illustreret på figur 6, er involveret en vis mængde kontrolteori. Vi spurgte William Folkner om de nye missioner var mere avancerede i denne henseende end de tidligere:

The Viking had powered descent. They had rockets coming down, a much more complex control than Pathfinder or MER. Much more complex. [1]

Der synes altså heller ikke i denne henseende at være noget at komme efter med hensyn til matematisk grundforskning. William Folkners svar antyder endda, at kontrolteorien snarere er på vej ud end ind i missionerne.

Den skjulte matematik

Når man betragter en rummission udefra er det klart, at den matematik, som indgår i arbejdet til en vis grad er »skjult«. Vi havde måske lidt naivt forestillet os, at når man kørte ind på JPLs område, så var matematikken i missionen pludseligt

meget mere synlig. Vores empiriske arbejde har imidlertid overbevist os om, at skjultheden ikke kun er et spørgsmål om at betragte missionen udefra eller indefra.

Skjultheden forekommer på flere niveauer. For den almindelige offentlighed er matematikken skjult i en masse teknologi, hvis virkemåde sjældent diskuteres i det offentlige rum. Denne skjulthed er muligvis betinget dels af mediernes angst for at frastøde læsere eller seere ved at formidle »kedelig« viden om missionerne og dels af de besværligheder, der normalt er forbundet med at formidle abstrakt matematik til ikke indviede. Denne skjulthed er ikke så interessant at diskutere for os, fordi den er så åbenlys.

Mere interessant er det, at matematikken i et vist omfang også er skjult inden for JPLs mure. Som omtalt tidligere er en stor del af den matematik, der udgør grundlaget for at løse missionernes mange problemstillinger, indlejret og dermed skjult i software-pakker. Disse software-pakker er i vid udstrækning kommercielle pakker, der er udviklet uden for JPL. For ansatte på JPL er det vigtigt at vide, hvordan pakkerne benyttes på korrekt vis, og det kræver sandsynligvis et vist matematisk kendskab, men den specifikke matematik, der indgår i pakkerne, er det ikke for JPL-folkene nødvendigt at forstå i detaljer.

Det er altså ikke urimeligt at sige, at matematikken i en vis forstand er udliciteret, og at implementeringen i pakker medvirker til at usynliggøre matematikken for JPLs ansatte. Som samtalen mellem William Folkner og Miguel san Martin på side 106 illustrerer, betyder dét at matematikken er usynlig, at den også i et vist omfang fortrænges fra bevidstheden.

Et andet forhold i denne sammenhæng, som er værd at nævne, er at JPLs projekter er så store, at sondringen mellem at være indenfor og udenfor til dels er meningsløs. En ansat, som arbejder med en særlig del af missionen, har naturligvis en *overordnet* opfattelse af, hvilken matematik, der er involveret i andre dele af missionen, men som nedenstående uddrag af en af vores samtaler med William Folkner viser, er detaljerne i høj grad skjulte. Samtalens indledende bemærkning var en vittighed, som skulle illustrere, at matematikken i missionen er *så* omfangsrig, at det er nemmere at se på den matematik, som *ikke* er involveret.

- We don't do any map theory for instance. Four color map problem. You know that? We don't do any of that. We don't really use any abstract algebra, group theory and that sort.

Except in the channel coding.

- They use abstract algebra and group theory in that?

The Reed–Solomon codes are based on Galois Fields.

- That's news to me. I didn't know that, all right, interesting. [11]

Channel coding – eller kanalkodning – er en teori, som gør det muligt 'matematisk' at gøre et signal, der transmitteres i rummet, modstandsdygtigt overfor interferens. Teorien kendes også under navnet *fejlkorrigerende koder*. William Folkner kendte tydeligvis ikke til teoriens fundament. Det er i øvrigt værd at bemærke, at Folkner siger »*They use abstract algebra and group theory in that?*« Dette antyder, at samhørigheden mellem de forskellige afdelinger på JPL ikke er så stor. Matematikken i MER er altså også til dels skjult fra afdeling til afdeling. Vores interviews

antyder, at de ansatte kun kender til detaljerne i den matematik, som de arbejder med til daglig.

JPL: Forbruger eller udvikler af matematik?

Vi har i det ovenstående forsøgt at beskrive nogle af de forhold, der gør sig gældende på JPL – både med hensyn til de ansatte og med hensyn til arbejdets form og indhold.

Det arbejde, der foretages på JPL, er ikke koncentreret om at finde nye og bedre løsninger på problemerne. I stedet vælges løsninger, som allerede er udviklede og afprøvede. Der er en lang række faktorer, som vi mener, understøtter dette.

En meget væsentlig faktor er, at matematik udviklet til lejligheden og implementeret i teknologi introducerer en række *usikkerhedsmomenter*. Der er for det første usikkerheden om, hvornår arbejdet gøres færdigt. Matematisk grundforskning er besværligt at passe ind under fastlagte deadlines, fordi det ofte er svært at vurdere, hvor lang tid det tager at løse et givet problem. For et sted som JPL, hvor deadlines er så vigtige og opsendelsesvinduerne for missionerne så små, kan forsinkelser ikke tolereres. Et andet usikkerhedsmoment har at gøre med afprøvning. Selvom man afprøver et nyt stykke teknologi med dertil indlejret matematik inden missionens opsendelsesfase, så ved man ikke, om alting fungerer korrekt, før missionen er i gang. Matematik og teknologi, som har været om bord på en tidligere mission, er ikke nær så usikker og er derfor et mere attraktivt valg.

En anden væsentlig faktor er økonomien. »Low-cost« missionerne er nødt til at genbruge fra mission til mission, for som Folkner udtrykker det:

Everything is a cost-benefit analysis. The whole space system is a cost-benefit analysis. [1]

En tredje faktor er et mere menneskeligt aspekt. De personer, der kommer til JPL, kommer der for at gennemføre rummissioner og ikke for at udvikle ny matematik. Motivationen bag det daglige arbejde er altså ikke at bedrive matematisk grundforskning. Dertil kommer krav om at vælge sikre, billige løsninger. Vi mener, at disse faktorer er med til at forstærke billedet af JPL som en matematik-forbruger frem for en matematik-udvikler.

Vi har i det foregående nævnt nogle konkrete matematiske problemstillinger, som optræder i MER-missionen. Disse problemstillinger mener vi ligeledes understøtter ovenstående pointe. Både Kalmanfilteret og Lost in Space problemet har været kendt og behandlet siden 1960'erne. At konstruere software, som implementerer Kalmanfilteret, og få den software til at fungere om bord på et rumfartøj er en kæmpe ingeniørmæssig udfordring, men det er ikke en *matematisk* udfordring. Det samme gælder for Lost in Space problemet.

Kontrolteorien i missionen er endnu et af de eksempler, som vi har nævnt. Vores samtaler med Jacob Matijevic og William Folkner antyder, at der ikke er udviklet noget kontrolteori specielt til MER-missionen. William Folkner antyder endda (se citatet på side 111), at kontrolteorien snarere er på vej ud af missionen end ind i den.

Hohmann-banekurven har været kendt siden 1925 og er den banekurve, der altid benyttes til Mars-missionerne. Banekurven er et godt eksempel på matematik, som bare skal pilles ned fra hylden, når der er brug for den. At de *behov*, der er for matematik i missionerne, i en vis grad allerede er dækket, betyder naturligvis også, at der ikke foretages nyudvikling. Som følgende kommentar fra Folkner illustrerer, har rover-missionernes matematiske behov i øvrigt ikke ændret sig særligt meget:

It is very similar. In terms of design of the trajectory, doing the computations for finding out what time of day it is and where to steer the antenna, which direction to put the arm in, it's very similar. I don't think the mathematics has changed very much. [1]

Umiddelbart ser det altså ikke ud til, at der er meget at komme efter med hensyn til matematik udviklet specifikt til MER. Der er heller ikke noget, der tyder på, at genbrugen af matematikken skulle være speciel for MER, men nærmere typisk for de nyere rummissioner. Vi spurgte Folkner, om det forhold, at roverne om bord på MER (og Pathfinder i 1996) var mobile enheder, havde introduceret ny matematik i missionerne:

I don't consider that a big mathematical difference. It is a huge technological difference, but not a big mathematical – I don't think there is a different class of mathematics invented to make it happen. [1]

Afrunding og konklusion

Vores undersøgelse peger på, at MER-missionen og andre aktuelle Mars-missioner i høj grad er forbrugere af matematik, men at missionerne giver meget lidt tilbage i form af grundforskning til matematiske teorier. Der er flere årsager til dette forhold.

For det første er Mars-missionerne prestigeprojekter med dertil hørende bevågenhed fra alle kanter, hvilket udmønter sig i en modvilje mod at introducere usikkerhedsmomenter i form af nyudviklet matematik. For det andet er de aktuelle Mars-missioner såkaldte »low-cost« missioner, som er nødt til at genbruge allerede eksisterende løsninger på de problemer, der altid skal løses, eksempelvis beregning af banekurver. Matematikken synes altså at være noget, der tages ned fra hylden efter behov og er i øvrigt til dels skjult for JPLs ansatte. Vores vurdering af de aktuelle Mars-missioner og af institutionen JPL er, at bidraget til matematisk grundforskning er yderst begrænset.

Det billede af Mars-missionen, som vi står tilbage med nu efter vores undersøgelse, er markant forskelligt fra vores oprindelige forestillinger. Vi havde regnet med, at missionernes ekstreme natur ville stille ekstreme krav til matematikken, og at den matematiske udvikling fra mission til mission derfor ville være langt større, end det synes at være tilfældet. De ekstreme krav, der stilles, synes for matematikkens vedkommende i højere grad at dreje sig om *ekstrem pålidelighed*. JPL beskæftiger en masse mennesker med helt konkrete, fastlagte arbejdsopgaver, som skal udføres efter et nøje fastlagt skema. Få mennesker er på JPL for at bedrive grundforskning. Krav om pålidelighed og rettidighed af det arbejde, der udføres, er naturligvis en væsentlig grund til dette.

Vores beskrivelse af arbejdets mere eller mindre fastlåste natur skal ikke opfattes som et udtryk for, at arbejdet på JPL er kedeligt og rutinepræget. Vores indtryk af arbejdet var nærmest det modsatte. Den fastlåste natur betyder blot, at muligheden for at bedrive matematisk grundforskning er yderst begrænset, ligesom tilstrømningen af nye matematiske ideer må formodes kun at foregå i ringe grad.

Denne beretning skal ikke opfattes som en kritik af NASAs Jet Propulsion Laboratory. Institutionen udfylder nemlig en anden særdeles vigtig rolle for matematikken – aftagerens rolle.

Litteratur

- [1] William Folkner, *Interview med doktor William Folkner den 17. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [2] Jon Hamkins, *Interview med doktor Jon Hamkins den 14. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [3] Uffe Thomas Jankvist and Bjørn Toldbod, *Matematikken bag Mars-missionen – En empirisk undersøgelse af matematikken i MER med fokus på kildekodning og kanalkodning*, Master's thesis, Oktober 2005, Tekster fra IMFUFA, nr. 449a.
- [4] ———, *Matematikken bag Mars-missionen – Indførelse i den grundlæggende teori for kildekodning og kanalkodning i MER*, Master's thesis, Oktober 2005, Tekster fra IMFUFA, nr. 449b.
- [5] ———, *Matematikken bag Mars-missionen – Transskriberede interviews fra DTU, Brown University, MIT og JPL*, Master's thesis, Oktober 2005, Tekster fra IMFUFA, nr. 449c.
- [6] JPL, *Mars Exploration Rover (MER) Project Mission Plan*, April 2002.
- [7] Aaron Kiely, *Interview med doktor Aaron Kiely den 14. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [8] Matthew Klimesh, *Interview med doktor Matthew Klimesh den 14. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [9] Mark W. Maimone, *Interview med doktor Mark W. Maimone den 17. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [10] Jacob Matijevic, *Interview med doktor Jacob Matijevic den 14. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.
- [11] Miguel san Martin and William Folkner, *Interview med doktor Miguel san Martin & doktor William Folkner den 14. marts 2005*, 2005, Foretaget på JPL, Pasadena.