

Algorytmika wyznaczania względnej pozycji łazików marsjańskich

Jan Kotlarz, Natalia Zalewska

Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwój metod nawigacyjnych w kolejnych misjach marsjańskich ZSRR, UE i USA oraz opisano najważniejsze algorytmy wyznaczania względnej pozycji na podstawie analizy zdjęć panchromatycznych rejestrowanych przez współczesne łaziki i zdjęć wykonanych przez satelity znajdujące się na orbicie Czerwonej Planety. Zaprezentowane wnioski mogą służyć jako wskazówki do wypracowania założeń i warunków przeprowadzenia eksperymentu użycia wybranych algorytmów na łaziku lub komputerze dowolnej platformy wielosensorowej.

Słowa kluczowe: algorytmy teledetekcyjne, algorytmy precyzyjnego pozycjonowania, Mars, łazik, systemy autonomiczne, teleobecność, obsługa naziemna

1. Wprowadzenie

Obecnie realizowane programy kosmiczne Europejskiej Agencji Kosmicznej zakładają obecność autonomicznych, mobilnych, wyposażonych w zaawansowane instrumenty naukowe łazików na powierzchni Księżyca i Marsa. Jedną z najważniejszych umiejętności w programach tego typu – poza *stricte* naukowymi zadaniami – jest precyzyjne wyznaczanie pozycji względem łazików na powierzchni Marsa czy Księżyca. W trakcie realizacji kolejnych misji tworzone były algorytmy określające położenie za pomocą analiz zdjęć wykonywanych przez umieszczone na robotach sensory. W efekcie tych prac okazało się, iż nie istnieje jeden algorytm zdolny precyzyjnie wyznaczyć położenie w każdym typie terenu i dla każdego rodzaju warunków. W ośrodku ESTEC Europejskiej Agencji Kosmicznej rozważane są dwie dalsze ścieżki ewolucji tego typu algorytmiki. Pierwsza – opracowanie na podstawie dotychczasowych wyników jednego algorytmu możliwego do użycia w większości warunków marsjańskich lub druga – wypracowanie metodyki walidacji danych wynikowych algorytmów, być może wzajemnej.

2. Warunki pracy łazików marsjańskich

Łaziki marsjańskie, te które już pracują na Marsie i te, które będą w przyszłości tam wysłane, muszą się zmierzyć z bardzo surowymi warunkami, jakie tam panują – skrajnymi temperaturami, burzami pyłowymi, zróżnicowanym podłożem skalnym itp.

Kiedy popatrzymy na mapy Marsa, uderzy nas przede wszystkim różnica między dwiema półkulami: północną i południową. To, że obie półkule Marsa diametralnie się od siebie

różnią, wyszło na jaw w latach 70. ubiegłego wieku, kiedy w okolicy Czerwonej Planety dotarły sondy *Viking*. Zrobione przez nie zdjęcia wprawiły naukowców w zdumienie. Północną półkulę Marsa pokrywały rozległe, płaskie niziny, południową zaś – wyżyny o wysokości od 4 km do 8 km ponad poziom północnych nizin.

Dychotomia planety jest różnie tłumaczona. Najbardziej popularną hipotezą jest uderzenie w Marsa kilka miliardów lat temu ogromnego obiektu wielkości Plutona, co miało stopić północną część skorupy, tworząc takie obszary jak *Vastitas Borealis* z równiną *Utopia Planitia*. Dodatkowo fala uderzeniowa, która okrążyła planetę, doprowadziła do powstania obserwowanych anomalii magnetycznych. Przypuszcza się, że w odległej przeszłości geologicznej planety obszary *Vastitas Borealis* pokrywał ocean, o czym świadczy dużo mniejsza liczba kraterów niż na półkuli południowej.

Wyżej na północ rozciąga się płaskowyż *Planum Boreum*, na którym dostrzec można północny biegun planety z dwukilometrową czapą lodową zamrożonej wody i CO₂. W pobliżu *Planum Boreum* znajduje się największe pole wydm na Marsie, nazwane *Olympia Undae*. Pola wydmowe są często dostrzegane wewnątrz kraterów meteorytowych.

Dalej w obszar *Vastitas Borealis* wcinają się wulkaniczne wyżyny *Tharsis* i *Elysium*. W regionie *Tharsis* znajdują się olbrzymie wulkany tarczowe, największe w Układzie Słonecznym. W północno-zachodniej części *Tharsis* wznosi się najwyższy 26-kilometrowy wygasły wulkan, *Olympus Mons*. Na północnym skraju wyżyny zlokalizowany jest względnie niski, lecz mający niemal równie dużą powierzchnię inny wulkan *Alba Mons*. W pobliżu centralnej części usytuowane są wulkany *Arsia Mons*, *Pavonis Mons* i *Ascraeus Mons*, tworzące pasmo *Tharsis Montes*.

Znalezienie wielkich kanałów na Marsie, dzięki sondom wysłanym już w latach siedemdziesiątych, nasunęło skojarzenia z ogromnymi rzekami przepływającymi przez te kanały. Przechodząc dalej na wschód od *Tharsis* zauważymy największą formację planety *Valles Marineris*. Jest to złożony system kanionów o długości ok. 5000 km, szerokości ok. 200 km i głębokość ok. 7 km, tłumaczony jako wielkie pęknięcie skorupy, czyli początek ryftu, w który następnie wkroczyła woda, tworząc systemy

Autor korespondujący:

Jan Kotlarz, jan.kotlarz@ilot.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 17.03.2015 r., przyjęty do druku 27.10.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

rzeczne kończące swój bieg m.in. w postaci delty w obszarze *Chryse Planitia*.

Południowa półkula Marsa, jak wspomniano, jest usiana kraterami (np. *Cimmeria Terra*, *Terra Meridiani*). Mars przez miliardy lat, a szczególnie w okresie Wielkiego Bombardowania Meteorytowego, które miało miejsce około 3,8 do 4,1 miliarda lat temu, był poddawany ciągłym kolizjom z mniejszymi od siebie obiektami kosmicznymi; często na tyle dużymi, że tworzyły takie kratery jak *Hellas* i *Argyre* o średnicy kilku tysięcy kilometrów.

Tak wiele typów powierzchni świadczy o burzliwej historii planety, która kryje w sobie jeszcze wiele tajemnic. Jednocześnie różnorodność ta okazała się być wyzwaniem dla algorytmiki przetwarzania obrazu pod kątem użyteczności w systemach nawigacyjnych.

3. Typy systemów nawigacyjnych łazików marsjańskich

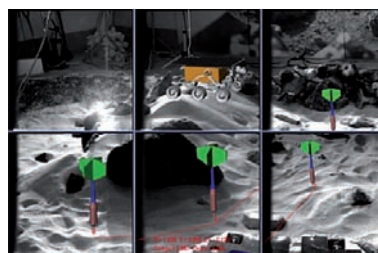
Do końca 2014 r. siedem razy podjęto próbę umieszczenia na powierzchni Marsa poruszającego się samodzielnie robota. Dwie pierwsze próby miały miejsce w 1971 r. Radzieckie misje Mars-2 oraz Mars-3 składały się z orbiterów oraz lądowników przypominających budową sondę Łuna 9. Lądowniki były wyposażone w kamery telewizyjne oraz spektrometry. Wewnątrz lądowników znajdowały się łaziki PrOP-M, które miały poruszać się w polu widzenia kamer lądownika oraz zatrzymywać się co 1,5 metra. W ten sposób obsługa naziemna misji miała oceniać poprawność wykonania manewru przemieszczenia się robotów. Oba łaziki nie mogły zostać przetestowane podczas poruszania się po Marsie. Misja Mars-2 zakończyła się rozbiciem lądownika, natomiast po lądowaniu w kraterze Ptolemeus sonda Mars-3 wykonała pierwsze zdjęcie powierzchni planety i rozpoczęła jego transmisję radiową, jednak po 14,5 sekundach łączność została utracona.

Łaziki PrOP-M miały poruszać się połączone z lądownikiem przewodem komunikacyjnym za pomocą konstrukcji przypominającej szyny. Już w tych pierwszych misjach zdawano sobie sprawę, że w pełni manualne sterowanie łazikami będzie bardzo trudne ze względu na odległość Marsa od Ziemi (10–20 minut świetlnych). Łaziki wyposażono zatem w system sensorów, np. penetrometry, mające przekazywać informację o napotkanych przeszkodach (np. większych kamieniach) i w ten sposób zautonomizować po części poruszanie się łazików [19].

Amerykańską odpowiedzią na radziecki program Mars były lądowniki *Viking-1* i *Viking-2*. Oba z sukcesem wylądowały na powierzchni planety w 1976 r. Należy jednak zauważyć, że Amerykanie skoncentrowali się na aspektach naukowych i technicznych, które nie wymagały mobilności lądowników. Program *Viking* zaowocował dużym doświadczeniem w transmisji danych na Ziemię (*Viking-1* przesłał pierwsze w pełni ostre zdjęcie powierzchni Marsa) oraz metodach badania gleby.

Również pierwszy europejski robot na Marsie był pozbawiony możliwości poruszania się. Będący częścią misji Mars Express (2003) lądownik *Beagle 2* został utracony po lądowaniu. Pierwotnie podejrzewano, że lądownik rozbił się o powierzchnię planety, jednak w styczniu 2015 r. na zdjęciach marsjańskiej równiny *Isindis Planitia* (wykonanych przez należącą do NASA sondę *Mars Reconnaissance Orbiter*) odnaleziono zaginiony lądownik. Analiza zdjęć wykazała, że po wylądowaniu nie rozłożyły się zarówno panele fotowoltaiczne, jak i antena systemu łączności [25].

Kolejnym po Vikingach mobilnym robotem na Marsie był amerykański *Sojourner*. Wylądował na Marsie w 1997 r. Projekt zawieszenia sześciu kół robota był tworzony z myślą o jeździe po nierównym, kamienistym terenie.



Rys. 1. Tryb graficzny programu planowania trasy przejazdu łazika *Sojourner* w Rover Control Workstation

Fig. 1. Graphic mode of the Rover Control Workstation user interface useful for *Sojourner* track planning

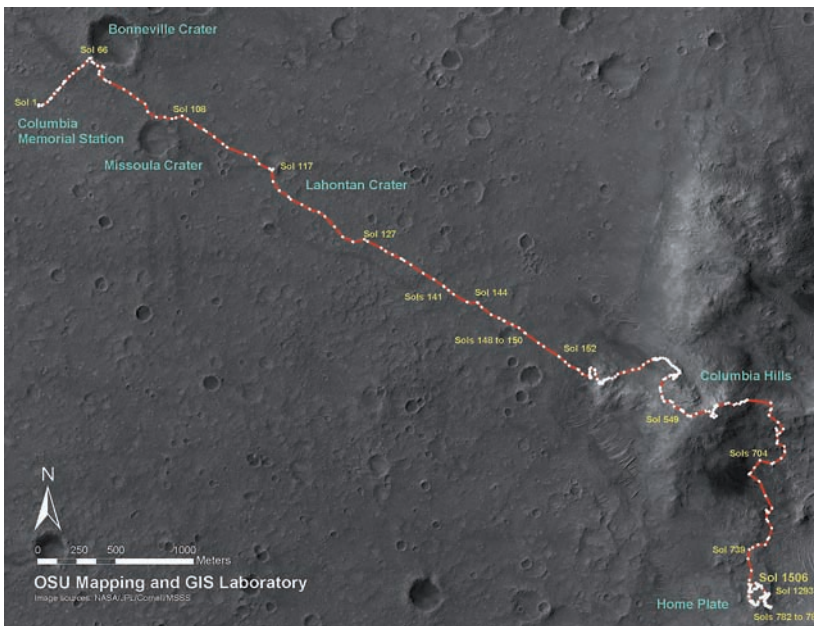
3.1. Rover Control Workstation

Zarówno łazik, jak i lądownik były wyposażone w kamery mogące wspierać funkcje nawigacyjne. Na łaziku do dyspozycji były dwie kamery monochromatyczne z przodu (768 px × 484 px), oraz jedna kolorowa (RGB) z tyłu. Poszczególne piksele na matrycy CCD kamery kolorowej były czułe na światło czerwone, zielone lub niebieskie, a precyzyjnie zdefiniowany układ tych pikseli został zdefiniowany w matrycach 4px × 4 px [11].

Przyjęta metodyka poruszania się łazika po otaczającej lądownik powierzchni *Ares Vallis* była bardzo nowatorska. *Sojourner* poruszał się po powierzchni na podstawie komend tworzonych na Ziemi i przesyłanych do niego drogą radiową przez orbiter misji *Mars Pathfinder*. Sekwencja komend do wykonania przesyłana była raz dziennie. Powstawała ona w stworzonym przez Briana Coopera systemie *Rover Control Workstation*. Jego częścią było specjalistyczne oprogramowanie wizualizujące operatorom na Ziemi graficzny model terenu, aktualne położenie łazika oraz umożliwiające planowanie dalszych sekwencji ruchu (rys. 1). Oprogramowanie to wykorzystywało do symulacji i trójwymiarowej wizualizacji danych superkomputer z grafiką *Silicon Graphics Onyx2*.

Wizualizacja modelu terenu i pozycji łazika mogła być zaprezentowana w formie stereoskopowej [18], tj. operator planujący trasę przejazdu zakładał specjalne okulary stereoskopowe, dzięki czemu widział obraz trójwymiarowy. Miał możliwość „poruszać się” po terenie, oceniać bezpieczeństwo łazika z różnych punktów w przestrzeni [7]. Inną funkcją oprogramowania była możliwość wirtualnego przesuwania łazika na zaplanowane miejsca. System obliczał na podstawie modelu terenu oraz pozycji startowej i końcowej trasę poruszania się łazika, wizualizował ją (czerwona linia biegnąca po podłożu – rys. 1), a na końcu po akceptacji operatora konstruował sekwencję poleceń dla systemów zainstalowanych na łaziku. Tę sekwencję można było już przesłać do wykonania na Marsa.

W podejściu tym widzimy zdecydowane ograniczenie autonomizacji pracy robota. Właściwie wszelkie decyzje dotyczące pracy systemów odpowiedzialnych za ruch robota podejmowane były na Ziemi na podstawie zdjęć z łazika i lądownika. Ograniczeniem tego podejścia była konieczność pozostawiania łazika w zasięgu kamer lądownika. Dzięki temu można było tworzyć numeryczny model terenu oraz oceniać pozycję robota za pomocą narzędzi stereoskopowych. Główna część tej pracy spoczywała jednak na operatorze na Ziemi. W efekcie na podstawie komend przesyłanych z Ziemi każdego dnia łazik przemieszczał się średnio o pół metra, operując w odległości 5–10 metrów od lądownika [23]. W 2,5 miesiąca przebył 52 metry, wykonał 15 analiz chemicznych i przesłał na Ziemię ponad pół tysiąca monochromatycznych i kolorowych zdjęć.



Rys. 2. Trasa przebyta przez łazik Spirit na Marsie [1]
Fig. 2. Spirit rover traverse map



Rys. 3. Trasa przebyta przez łazik Opportunity na Marsie [2]
Fig. 3. Opportunity rover traverse map

3.2. Hazard Avoidance Software

Niewątpliwie jedną z najefektywniejszych kosmicznych misji bezzałogowych była amerykańska misja dwóch łazików *Spirit* i *Opportunity* – Mars Exploration Rovers (2004–). Pierwotne założenie funkcjonowania na powierzchni Marsa dwóch bliźniaczych łazików przez 90 dni zostało wielokrotnie przekroczone.

Spirit (*MER-A*) wylądował w kraterze *Gusiew* 4 stycznia 2004 r. Po powierzchni poruszał się za pomocą trzech par kół. Do 26 stycznia 2010 r. robot pokonał dystans 7730,5 m. W tym dniu łazik został umieruchomiony ze względu na uwięzienie kół na niewielkim obszarze pokrytym luźnym piaskiem (miejsce to nazwano potem *Trojka*). Po wielu próbach wydostania łazika z piasku NASA zdecydowała o przekształceniu go w stacjonarną platformę badawczą. Dnia 22 marca 2010 r. *Spirit* przesłał ostatnie dane.

Opportunity (*MER-B*) wylądował w małym kraterze na pozbawionej skalistych form geologicznych równinie *Meridiani Planum* 21 stycznia 2004 r., 20 km od planowanego miejsca lądowania. Ze względu na duże ryzyko niebezpiecznego przechylenia się robota przez cały planowany okres misji (3 miesiące) łazik nie opuszczał krateru prowadząc badania geologiczne. Dopiero po tym czasie podjął próbę wydostania się na powierzchnię i wyruszył w kierunku innego krateru *Endurance*. Po 180 dniach marsjańskich badań tego obiektu, łazik wyruszył w kierunku dalszych kraterów, w tym krateru *Victoria*. Łazik funkcjonuje do dzisiaj.

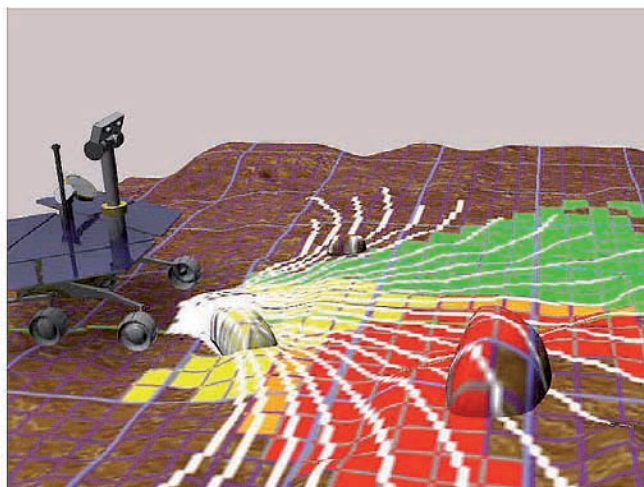
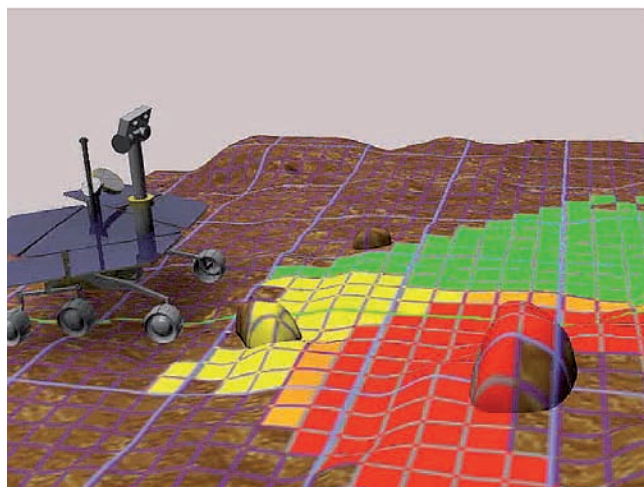
Podobnie jak w przypadku łazika *Sojourner* generalna kontrola nad projektowaną trasą i systemami napędowymi łazików odbywała się w ośrodku na Ziemi, jednak podobnie jak w misjach radzieckich robotów *PrOP-M* łaziki MER wyposażono w sensory mogące rozpoznawać zagrożenia związane z przejazdem po niewielkim kamieniu, przejazdem po małym zagłębieniu itp. Z sensorami proprioceptycznymi (np. akcelerometrami) zintegrowano oprogramowanie komputera łazika przetwarzające dane. System ten pozwalał na bezpieczne pokonywanie lub omijanie przeszkód typu geometrycznego. Nie był jednak odporny na zagrożenia pozostałych typów, np. niewystarczającej wytrzymałości terenu. Przy projektowaniu misji konieczne było zatem stworzenie autonomicznego systemu nawigacji pozwalającego swobodnie poruszać się z prędkością 600–1000 m w ciągu pla-

nowanego czasu misji (ok. 0,5 m/h) między zadanymi z Ziemi dowolnymi punktami na powierzchni planety. W tym celu powstał dość zaawansowany system nawigacji autonomicznej danych o położeniu.

3.3. Terrain Assessment

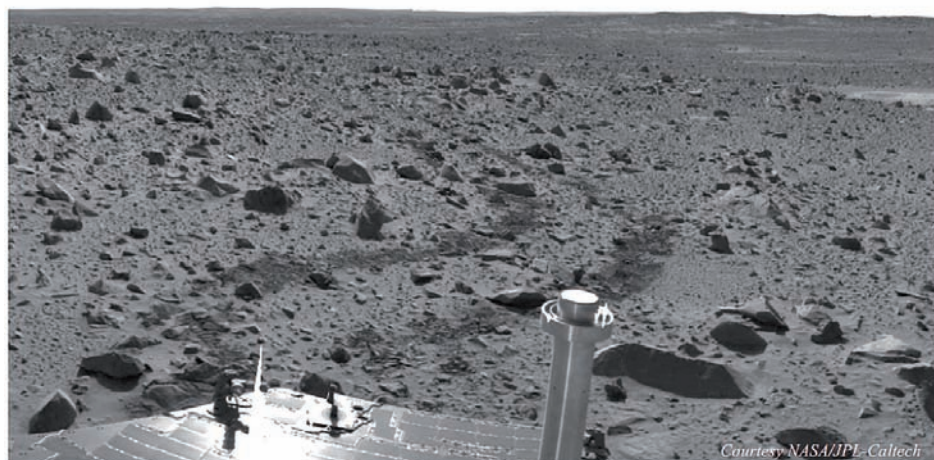
Pierwszą technologią dostarczającą informacji niezbędnych do analiz był algorytm budowy numerycznego modelu terenu wokół łazika na podstawie zdjęć. Technologia ta korzystała z metod pasywnych stereofotogrametrii. Automatyczne łączenie odpowiadających sobie na dwóch zdjęciach punktów powodowało wygenerowanie chmury punktów w przestrzeni 3D modelu matematycznego terenu. Na podstawie tych punktów algorytm wykonywał triangulację.

W testach oprogramowania łazików wykorzystano wiele z algorytmów stereofotogrametrycznych, przez wiele lat rozwijanych przez JPL NASA, szczególnie algorytmy Forsyth & Ponce 2003 [12], Urbie [17], PreceptOR [22]. Już w trakcie prawdziwej misji na Marsie potwierdzono, że tego typu algorytmika jest niezwykle atrakcyjna dla autonomicznych misji kosmicznych ze względu na stosunkowo niski pobór mocy i brak konieczności używania manipulatorów lub obracających się części.



Rys. 4. Po lewej: analiza bezpieczeństwa przejazdu po punktach mapy wykonana przez algorytm GESTALT, po prawej: analiza bezpieczeństwa poszczególnych możliwych torów ruchu (za: Maimone 2010)

Fig. 4. Left: Safety analysis of the selected points calculated by GESTALT algorithm; right: safety analysis of the selected tracks



Rys. 5. Łazik Spirit automatycznie omija zbyt duże kamienie – fotografia tylnej kamery pokazuje ślady kół łazika (Sol 107)

Fig. 5. Spirit rover automatically bypasses too large rocks – rear view camera shows the rover's track (sol 107)

Stosowane w łaziku *Sojourner* pierwsze algorytmy tego typu potrafiły tworzyć na podstawie jednej pary zdjęć model terenu złożony z maksymalnie 20 punktów w przestrzeni 3D. Na przykładzie łazików *MER* widzimy tutaj znaczny postęp w stosowaniu algorytmiki stereometrycznej. *Opportunity* tworzył siatki 49 000 punktów z jednej pary zdjęć wykonanych kamerami *NavCam*, natomiast *Spirit* tworzył na podstawie zdjęć wykonanych kamerami *Hazcam* 15 000 punktów. Duże znaczenie w tak wielkiej różnicy efektywności systemu tworzenia modelu terenu ma także szybkość procesorów na których wykonywano obliczenia: 0,1 MHz na *Sojourner* oraz 20 MHz na łazikach *MER*.

Samo wytworzenie numerycznego modelu okalającego łazik terenu nie dawało jeszcze wystarczającej informacji dla wyboru bezpiecznej drogi. W interpretacji modelu wykorzystano algorytm GESTALT [3], zaproponowany pierwotnie dla prototypu robota *JPL Athena Rover* [4]. Algorytm GESTALT generował w pamięci komputera łazika (na podstawie modelu terenu) wyśrodkowaną w punkcie, gdzie znajdował się łazik mapę o rozdzielczości 20 cm (~średnica koła łazika). Każdemu punktowi mapy przyporządkowana była wielkość opisująca bezpieczeń-

stwo poruszania się łazika po tym punkcie. Z każdą wykonaną parą zdjęć zarówno model terenu, jak i w efekcie mapa reprezentująca bezpieczeństwo jazdy po tym terenie była aktualizowana [15].

3.4. Path Selection

Ponieważ komendy przesyłane z Ziemi zawierały zazwyczaj informację jedynie o kolejnym celu, oprogramowanie robota samo musiało wybrać optymalną ścieżkę. Służyła do tego odrębna technologia wykorzystująca analizy pochodzące z algorytmu GESTALT i numerycznego modelu terenu.

W pierwszym kroku wyznaczano pewien dopuszczalny błąd określający, w jakiej odległości od wyznaczonego celu może znaleźć się łazik. W drugim kroku algorytm analizował wszystkie możliwe ścieżki od aktualnej pozycji łazika do celu, poddając je ocenie na podstawie mapy bezpieczeństwa pochodzącej z algorytmu GESTALT. Potencjalne ścieżki były dzielone na mniejsze części i potem ewentualnie „składane” w jedną drogę do celu. Te potencjalne ścieżki były porównywane ze względu na ich sumaryczne bezpieczeństwo.

Należy zauważyć, że zarówno *Spirit*, jak i *Opportunity* do generowania potencjalnych ścieżek używały zarówno przednich, jak i tylnych kamer. Dzięki obecności kamer z obu stron istniała możliwość walidacji działania algorytmiki.

3.5. Pose update

Najprostszą i najczęściej używaną metodą detekcji zmiany położenia łazika jest analiza obrotu kół. Jest ona w miarę niezawodna na łagodnym, pozbawionym wystających elementów terenie. W przypadku łazików *MER* zastosowanie tego typu odometrii bez jakiegokolwiek korekty nie było optymalne. W efekcie na potrzeby programu powstał algorytm *VisOdom* [6], którego jedynym zadaniem była korekcja pozycji obliczonej na podstawie analizy obrotu kół za pomocą zdjęć stereometrycznych wykonanych przez łazik (tych samych, które służyły do tworzenia numerycznego modelu terenu). Należy zauważyć, że zadanie to nie było łatwe. Pozycja łazika oznaczana była w sześciowymiarowej przestrzeni metrycznej: trzy pierwsze wymiary to położenie (x, y, z), trzy ostatnie to obrót łazika (kąty pitch, roll, yaw).

3.6. Curiosity Autonomous Navigation

Zastosowany w łazikach *MER* system autonomicznej nawigacji okazał się na tyle dobry, że użyto go także w najnowszym marsjańskim łaziku *Curiosity* wysłanym przez NASA na Czerwoną Planetę w ramach programu *Mars Science Laboratory*. Trzy opisane powyżej typy algorytmów zostały zaadoptowane do zupełnie nowych rozwiązań sprzętowych łazika. Tym razem do dyspozycji analiz stereofotogrametrycznych mamy cały zestaw kamer nawigacyjnych. Na maszcie łazika znajduje się siedem kamer: teleskopowa kamera Makro, cztery czarno-białe kamery nawigacyjne (Navcam) (dwie z lewej, dwie z prawej strony masztu) i dwie kolorowe kamery masztowe z matrycami o wielkości 2 MPx. Na podwoziu łazika jest zamontowanych osiem kamer dostarczających czarno-biały obraz o niskiej rozdzielczości, szczególnie zabezpieczonych przed uderzeniami odłamkami skał (HazCams), z matrycami o wielkości 1 MPx. Z przodu łazika znajdują się dwie lewe kamery i dwie prawe, podobnie z tyłu. Kamery Hazcams posiadają szerokokątne obiektywy typu rybie oko. Osiem kamer Hazcams i cztery kamery nawigacyjne Navcams wchodzi w skład zestawu 12 kamer technicznych będących źródłem przestrzennego obrazu tworzącego stereoskopowe oczy robota *Curiosity*.

Analizom stereometrycznym i nawigacyjnym dedykowany jest jeden z dwóch 200 MHz komputerów pokładowych.

Przegląd zastosowanych w praktyce metod określania pozycji łazików na Marsie wskazuje, że także w przyszłych misjach decydujące znaczenie będzie mieć system nawigacji oparty z jednej strony o detektory ruchu (akcelerometry) i odometrię, a z drugiej strony o analizy stereofotometryczne modelujące teren, walidujące dane ze standardowych pomiarów oraz generujące swoje własne, niezależne analizy położenia łazika. W następnym rozdziale przedstawimy najważniejsze z algorytmów tego typu.

4. Wspomaganie analizy położenia za pomocą zdjęć satelitarnych

Wypracowana w dotychczasowych misjach, szczególnie podczas pracy łazików *Sojourner*, *MER* oraz *Curiosity* metodyka wydaje się być niezwykle precyzyjna. Obecnie prace prowadzone w ośrodku ESTEC Europejskiej Agencji Kosmicznej polegają przede wszystkim na rozwinięciu jej w oparciu o dane satelitarne. Obecnie powierzchnię Marsa fotografują dwie sondy: *Mars Reconnaissance Orbiter* (NASA) oraz *Mars Express* (ESA). Poniżej przedstawiamy podejście do problemu

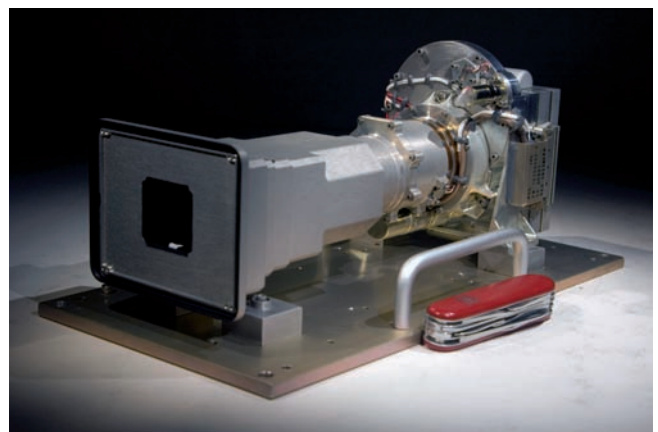
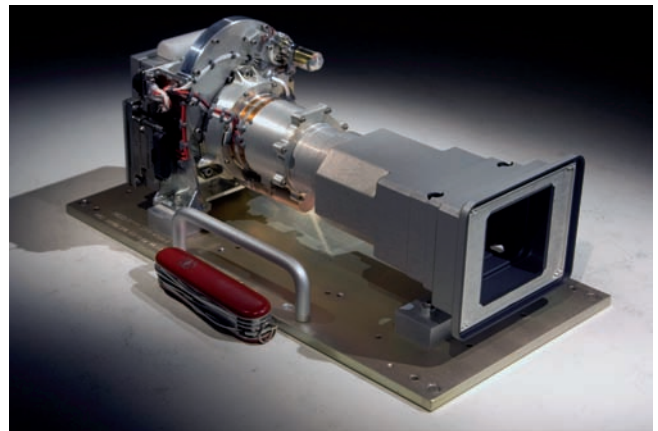
integracji dotychczasowych algorytmów z szerszym wykorzystaniem danych satelitarnych i pozyskiwanych podczas lądowania wypracowany przez grecko – holenderski zespół w składzie: E. Boukas, A. Gasteratos (University of Tharce) i G. Visentin (ESTEC, ESA). Metoda polega na projekcji na podkład mapowy dwóch zbiorów danych:

- zbiór pierwszy powstaje przez analizę zdjęć wykonanych przez łaziki – na podkład nanoszony jest pewien graf łączący charakterystyczne miejsca – elementy krajobrazu;
- zbiór drugi powstaje przez przetworzenie zdjęć satelitarnych.

W wyniku projekcji powstają dwa grafy umieszczone na podkładzie mapowym. Przez badanie zgodności topologii grafów walidowana jest analiza wykonanej przez algorytmikę łazika analiz zdjęć oraz nanoszone są na te analizy pewne poprawki. W analizach zdjęć tego zespołu implementowane są trzy techniki: „descent imagery”, analiza wyglądu widnokregu oraz analiza obecności tych samych elementów na zdjęciach łazików i satelitarnych.

4.1. Descent Imagery

Technika ta została zaproponowana w pracy L. Matthiesia w 1997 r. [16]. Głównym źródłem informacji o terenie wokół łazika są zdjęcia pochodzące z lądownika, a wykonane w czasie opadania łazika na powierzchnię Marsa. Warto zaznaczyć, że w przypadku łazika *Curiosity* na module lądownika zamontowano specjalną kamerę MARDI, która w trakcie lądowania zapisywała film z częstotliwością 4 klatek na sekundę o rozdzielczości 1200 px × 1600 px z czasem ekspozycji 4 ms na karcie pamięci typu flash. Na podstawie kolejnych obrazów

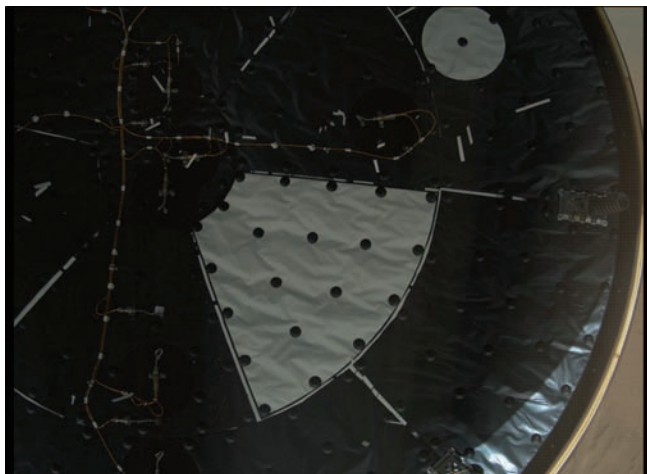


Rys. 6. Kolorowe kamery masztowe o obiektywach 34 mm i 100 mm umieszczone na łaziku *Curiosity*

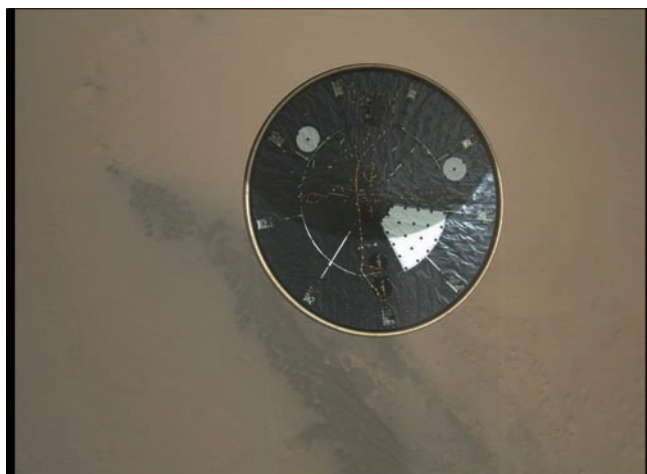
Fig. 6. Curiosity rover MastCam system: two color cameras, 34 mm and 100 mm lenses



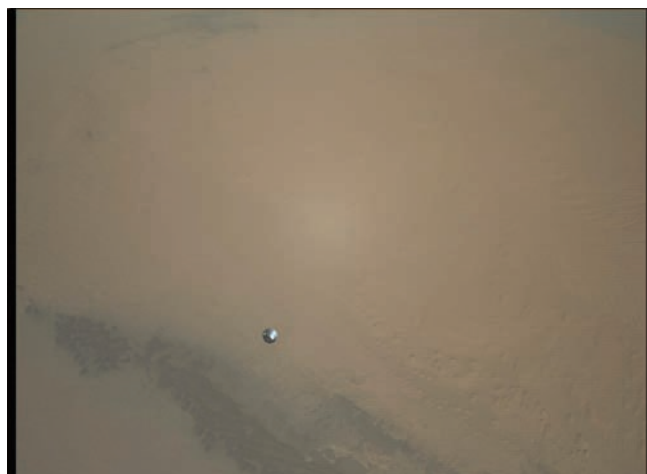
Rys. 7. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:28 UTC (widoczna kapsuła zawierająca łazik)
Fig. 7. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:28 UTC (capsule with rover inside visible)



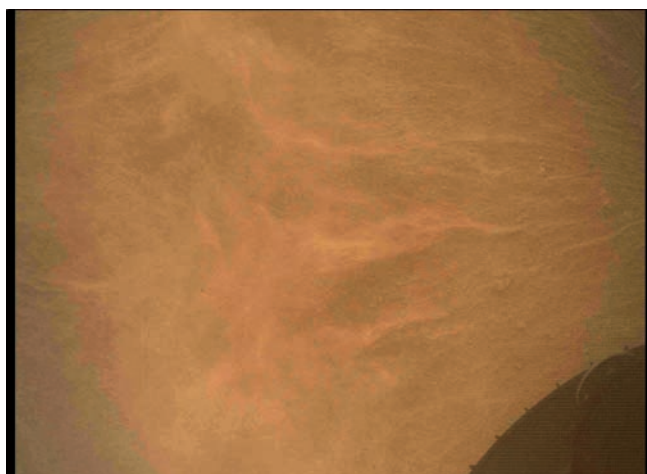
Rys. 8. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:29 UTC (widoczna kapsuła zawierająca łazik)
Fig. 8. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:29 UTC (capsule with rover inside visible)



Rys. 9. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:36 UTC (widoczna kapsuła zawierająca łazik)
Fig. 9. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:15:36 UTC (capsule with rover inside visible)



Rys. 10. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:17:29 UTC
Fig. 10. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:17:29 UTC



Rys. 11. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:17:53 UTC
Fig. 11. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:17:53 UTC



Rys. 12. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:21:48 UTC (po wylądowaniu)
Fig. 12. Mars Descent Imager, 2012-08-06 05:21:48 UTC (after landing)

można zdefiniować faktyczną pozycję łazika *Curiosity* po wylądowaniu (rys. 7–12). Po wylądowaniu na powierzchni planety kamera zarejestrowała zdjęcia gruntu pod nią z rozdzielczością 1,5 mm na piksel.

Na podstawie kolejnych zdjęć z kamer tego typu wykonywana jest mapa DEM (*Digital Elevation Map*). W pracy Matthiesa można znaleźć teoretyczny dowód na poprawność generowania DEM za pomocą kolejnych zdjęć opadającej kamery. Każde ze zdjęć, w przeciwieństwie do obrazowania satelitarnego, różni się skalą. Autorzy przedstawiają metodykę, zgodnie z którą w sposób automatyczny na kolejnych zdjęciach identyfikowane są te same elementy krajobrazu. Model DEM tworzony jest na podstawie różnic we względnym położeniu na kolejnych zdjęciach elementów znajdujących się na różnej wysokości.

W metodyce tej przedstawione są także podejścia do zagadnienia lokalizacji na zdjęciach samego łazika, m.in.:

- porównanie modeli 3D terenu wykonanych na podstawie zdjęć wykonanych z kamer typu MARDI oraz zdjęć satelitarnych,
- identyfikacja tych samych elementów na zdjęciach z łazika po wylądowaniu oraz na zdjęciach wykonanych w trakcie opadania na powierzchnię.

4.2. Konstrukcja DEM

Matematyczny model konstrukcji DEM na podstawie zdjęć wykonanych podczas opadania można znaleźć w pracy F. Xu z 2001 r. [24]. Zakładając, że rejestrację obrazu rozpoczynamy na wysokości ~5000 m konstrukcja ostatecznego DEM składa się z trzech kroków:

- początkowe generowanie DEM co 1 m wysokości,
- udoskonalenie optymalnej różnicy wysokości w kolejnych iteracjach generowania DEM,
- generowanie hierarchicznego co do rozdzielczości DEM.

Do każdego dwóch kolejnych zdjęć przypisywana jest transformacja afiniczna o sześciu parametrach. W ten sposób poszczególne klatki mogą być na siebie „nałożone”, odwzorowując teren z coraz większą rozdzielczością. Jest to metodyka powszechnie przyjęta przy analizie obrazu tego samego terenu, używając zdjęć o różnej rozdzielczości. W 2014 r. analogiczną transformację aplikowano chociażby w oprogramowaniu stworzonym w 2013 r. w Instytucie Lotnictwa [10] wybranym do porównywania zdjęć lotniczych (pułap ~0,6 km) i satelitarnych (~200 km) tych samych obszarów leśnych. Można tu zauważyć pewną analogię, szczególnie co do zdjęć wykonywanych nad Ziemią bardzo lekkimi, podatnymi na podmuchy wiatru samolotami typu UAV. Zarówno podczas lotów UAV, jak i podczas opadania lądowisk z użyciem spadochronów występują dość duże wahania (zmiennosc kątów pitch, roll i yaw). Warunki te utrudniają nakładanie na siebie zdjęć, natomiast obliczenie transformacji afinicznej między kolejnymi zdjęciami może posłużyć chociażby jako informacja, iż niektóre z obiektów na zdjęciu pierwszym mogą już nie występować na zdjęciu drugim.

4.3. Oznaczanie pozycji łazika na DEM

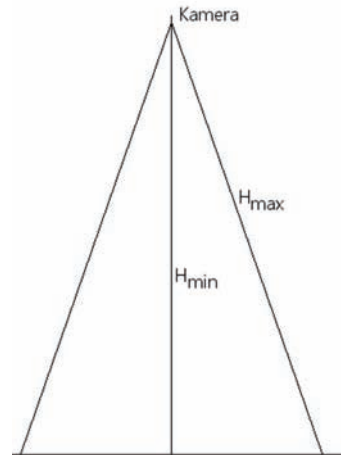
Podczas konstrukcji DEM na podstawie zdjęć z opadania ważna jest szybka identyfikacja tych samych obiektów na kolejnych klatkach. Liczba (gęstość) tych obiektów definiuje rozdzielczość DEM. Efektywna, uzyskiwana w testach rozdzielczość wynosi 1–0,1 m. Najwyższa rozdzielczość opisuje miejsce lądowania lądownika.

Wyznaczanie pozycji lądującego łazika odbywa się na każdym kroku (przy każdej fotografii). W 2000 r. w pracy [14] znalazł się matematyczny dowód na maksymalny błąd tej metody określenia położenia do 0,1% na każde 500 m wysokości. Ograniczeniem metody oznaczania pozycji łazika na DEM jest pokrycie DEM stosunkowo niewielkiego terenu i względnie niską rozdzielczością zdjęć wykonywanych przez kamery typu MARDI. Przy

starciu procesu fotografowania na wysokości 5000 m teoretyczna rozdzielczość zdjęcia dla kamery MARDI wynosi

$$d = \frac{2}{D}(htg\alpha)$$

gdzie D oznacza szerokość (wysokość) zdjęcia w pikselach, α szerokość kątową patrzenia kamery, h oznacza odległość kamery od powierzchni. Zauważmy, że h jest różne dla poszczególnych pikseli na zdjęciu (rys. 13).



Rys. 13. Rozdzielczość zdjęcia nie jest jednakowa dla wszystkich jego punktów

Fig. 13. The image resolution is not the same for all of its points

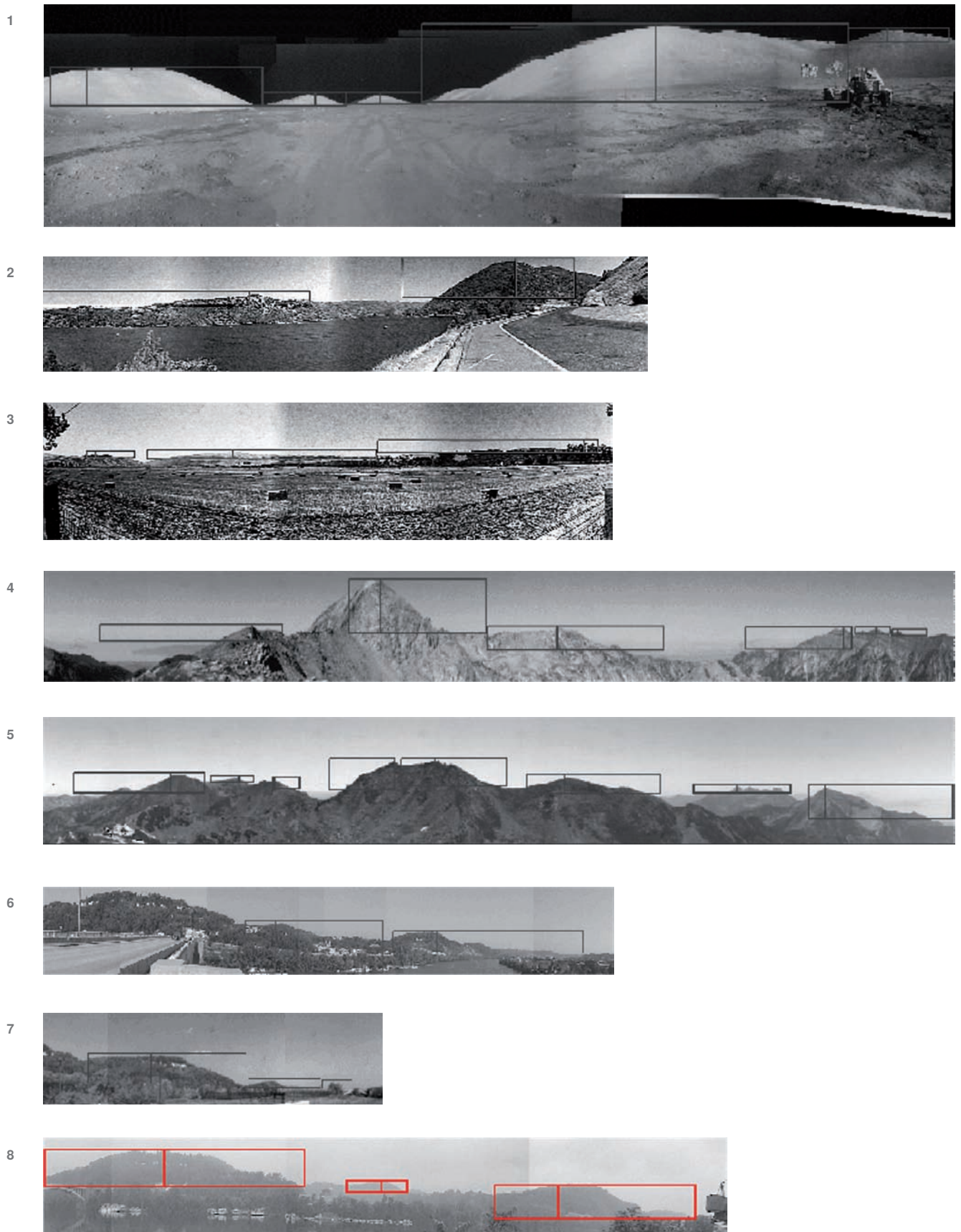
Dla kamery MARDI i wysokości 5000 m rozdzielczość zdjęcia waha się zatem od $d = 6,15$ m/piksel na środku zdjęcia do niecałych $d = 9,00$ m/piksel w jego rogach. Wielkości te są poprawne przy założeniu, że kamera patrzy prostopadle do płaszczyzny terenu. Im większe przekrzywienie kamery, tym bardziej rozdzielczość maleje. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie modeli terenu wykonywanych na podstawie zdjęć satelitarnych. Mając jednak na uwadze to, że rozdzielczość tych zdjęć obecnie waha się od kilku do 0,30 m/piksel, modele te mogą być niewystarczające do wykorzystania przy poruszaniu się łazików.

Kolejnym problemem jest umiejscowienie wytworzonej DEM w globalnym systemie lokalizacji. Zaproponowana metodyka nie daje tutaj odpowiedzi, jak przekształcić lokalnie zdefiniowane współrzędne do globalnego systemu.

Następnym problemem jest konieczność wyboru punktów charakterystycznych na zdjęciach wykonywanych w trakcie lądowania przez operatora na Ziemi. Ze względu na częsty brak bardzo charakterystycznych punktów i dynamiczną zmienność obrazu podczas opadania znaczniki terenowe muszą być wybierane przez człowieka, choć nawet w tym trybie jest to często niezwykle trudne i pogarsza precyzję wyznaczania położenia nawet o 300% [5].

4.4. Skyline matching – VIPER

Technika oparta na analizie linii widnokregu nie jest generalnie stosowana do wyznaczania pozycji łazika, lecz do walidacji wcześniej określonej pozycji przy użyciu dostępnych modeli terenu. Podejście to jest rozszerzeniem metodyki wyznaczania pozycji na podstawie położenia Słońca, która w implementacjach dotyczących łazików marsjańskich dawała precyzję 20 km [8]. Obecnie w wielu publikacjach [20] nadal używa się



Rys. 14. Detekcja charakterystycznych punktów widokowego (grupa Cozman/Korotkov). 1 – panorama wykonana podczas misji Apollo-17; 2, 3 – testowe zdjęcia (Kalifornia); 4, 5 – zdjęcia prof. Williama Thompsona jako materiał testowy do detekcji dalekich lub niewielkich szczytów górskich; 6–8 zdjęcia z Pitsburga – algorytm poprawnie wykrył szczyty wzniesień, z wyjątkiem najwyższej góry na zdjęciu 6 (błąd wywołany obecnością słupa po lewej stronie zdjęcia w pobliżu szczytu) [www.cs.cmu.edu/~viper]

Fig. 14. Peak detection results from a wide variety of scenes (Cozman/Korotkov group). 1 – the panorama composes a sequence of images taken by the Apollo 17 Lander Module; 2, 3 – panoramas from California; 4, 5 – panoramas acquired by prof. William Thompson and his group for very small sequences of mountains that are quite distant detection; 6–8 – panoramas obtained in Pittsburgh. All distinct mountains are detected, except the biggest mountain in picture 6 [www.cs.cmu.edu/~viper]

położenia Słońca, by ustalić pierwotną orientację kamer łazika po wylądowaniu.

Najbardziej zaawansowaną metodykę wykorzystywania linii widnokregu opracowały dwa zespoły: Stein/Medioni [20] oraz Cozman/Korotkov [9] znaną pod nazwą Visual Position Estimation for Rovers (VIPER). Metodyka ta dzieli się na poniższe elementy:

- algorytm detekcji linii widnokregu na zdjęciu łazika,
- algorytm generujący linię widnokregu wykorzystując DEM oraz postulowaną pozycję łazika,
- algorytm definiujący charakterystyczne elementy linii widnokregu (opcjonalnie),
- estymacja poprawek do zakładanej pozycji łazika z użyciem porównania linii widnokregu generowanego przez DEM oraz zarejestrowanego przez kamerę łazika.

Teoretycznie podejście to umożliwia obliczenie teoretycznego widnokregu i jego punktów charakterystycznych dla każdego punktu w rozpatrywanym terenie, jednak jeśli do budowy DEM użyjemy jedynie zdjęć wykonanych w trakcie lądowania, to do generowania modelu widnokregu będziemy mogli użyć danych z bardzo niewielkiego obszaru (dla kamery MARDI będzie to powierzchnia około $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$). Tymczasem jako elementy widnokregu mogą pojawić się wzgórza lub ściany kraterów widoczne w dalszej odległości, zatem wydaje się tu istotne, aby do budowy DEM użyć również DTM opartych na danych satelitarnych nawet jeśli będą one w niskiej rozdzielczości.

Należy przypomnieć, że pierwsze zdjęcia krateru *Endeavour* wykonane przez kamery łazika *Opportunity* zostały wykonane ponad 20 km od jego północnej obręczy. Gdybyśmy do konstruowania widnokregu używali danych z promienia 10 km, widnokrąg w tym miejscu musiałby być gładki, tymczasem na rzeczywistym zdjęciu widzimy wyraźnie obręcz krateru.

5. Metodyka lokalizacji globalnej z użyciem zdjęć satelitarnych

Począwszy od łazików MER podjęto próby umiejscowienia łazików w kontekście globalnej lokalizacji przy użyciu zdjęć satelitarnych [13]. Całość prac wykonywano na Ziemi w post-processingu zdjęć łazika przesłanych drogą radiową. Zajmowało się tym Laboratorium GIS na Uniwersytecie Stanowym w Ohio. Zespół laboratorium używał oprogramowania typu GIS do wizualnego umieszczenia zdjęć wykonanych przez łaziki w wytworzonych za pomocą danych satelitarnych dla fragmentów powierzchni Marsa systemach informacji przestrzennej. 90% prac polegających na selekcji punktów wiążących na parach zdjęć wykonywanych było automatycznie za pomocą

oprogramowania typu GIS, jednak proces identyfikacji miejsca wykonania zdjęcia musiał być przeprowadzany ręcznie przez człowieka.

5.1. Algorytm spasowania modeli terenu

W 2013 r. zespół pod kierunkiem B. Van Phama opracował obiecujący algorytm pozwalający w efektywny sposób spasować dwa modele terenu wykonane z poziomów satelitarnego/UAV oraz kamer łazika [21]. W pierwszym kroku komputer tworzy *Digital Elevation Model* (DEM) na podstawie zdjęć z dwóch kamer umieszczonych na łaziku. Następnie DEM wytworzony na podstawie zdjęć lotniczych lub satelitarnych oraz wytworzony przez łazik lokalny DEM konwertowane są do jednolitej siatki o zadanej rozdzielczości bliskiej, rozdzielczości satelitarnej/lotniczej.

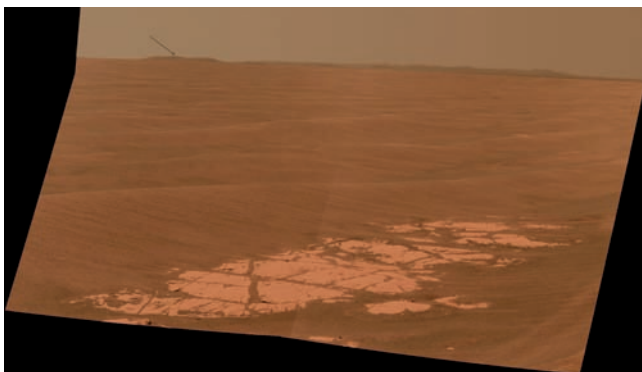
Algorytm został przetestowany na piaszczystym terenie z użyciem DEM wytworzonych na podstawie zdjęć lotniczych. W eksperymencie wyznaczono również punkty georeferencyjne i umieszczono tam znaczniki terenowe. W wyniku testu uzyskano następujące rezultaty:

- maksymalny promień względnego początkowego przesunięcia obu modeli DEM względem siebie, dla którego uzyskano zbieżność czyli spasowano je ze sobą, wyniósł 58–78 m,
- dokładność wyznaczenia pozycji na podstawie spasowanych modeli DEM wyniosła ok. 1 m, co jest wielkością siatki DEM lotniczego.

Dwa główne problemy wydają się uniemożliwiać stosowanie tego algorytmu w odniesieniu do łazików marsjańskich. Po pierwsze, początkowa niepewność położenia łazika może sięgać dziesiątek kilometrów, co uniemożliwi osiągnięcie krytycznego punktu zbieżności obu modeli DEM. Po drugie, dla bardzo dużych DEM konieczność sprawdzania kolejnych prawdopodobnych położenia łazika z rozdzielczością DEM może być niewykonalne od strony obliczeniowej na komputerach umieszczonych na robotach.

6. Wnioski

Kolejne misje łazików marsjańskich kładły coraz większy nacisk na wykorzystanie zdjęć stereofotogrametrycznych wykonywanych przez same łaziki do określania ich położenia i orientacji przestrzennej. Analizy wykonywane na coraz mocniejszych komputerach robotów początkowo służyły przede wszystkim do bezpiecznego omijania przeszkód i miejsc niebezpiecznych pod względem ukształtowania powierzchni. W dalszej kolejności z sukcesem podjęto próbę wypracowania metodyki lokalizującej łaziki na lokalnej mapie elewacji terenu. W chwili obecnej



Rys. 15. Obręcz krateru Endeavour (zaznaczona strzałką). Zdjęcie wykonane przez łazik Opportunity, fot. JPL NASA

Fig. 15. Endeavour crater rim. Image taken by the Opportunity rover, JPL NASA



Rys. 16. Ral Space's Rimmel robot służący do testów algorytmu Van Pham, fot. Stanford University

Fig. 16. Ral Space's Rimmel robot for Van Pham algorithm validation, Stanford University

trwają próby wypracowania metodyki lokalizacji łazików na mapie globalnej. Ograniczeniami proponowanych algorytmów są zarówno niezbyt wielkie moce obliczeniowe komputerów, jak również zakładany brak modeli terenu, na którym ląduje łazik, ewentualnie zakłada się dostępny model terenu, lecz o rozdzielczości niższej niż zakładana precyzja poruszania się łazika. Głównym zadaniem jest dziś wypracowanie metodyki korelacji danych geometrycznych pozyskanych kamer łazika z danymi satelitarnymi, ewentualnie z danymi pozyskanymi podczas procesu lądowania. Należy zwrócić uwagę na niezwykle małą liczbę testów tego typu algorytmów z użyciem samolotów lub UAV. Implementacja danych pozyskanych ze zdjęć lotniczych w środowisku typu GIS może pozwolić wykryć potencjalne błędy w tworzeniu algorytmiki i oprogramowania implementowanych na komputerach łazików. W tym celu należałoby przeprowadzić loty fotogrametryczne z kamerą niemetryczną na zróżnicowanym pułapie. Pozyskany materiał mógłby służyć jako materiał doświadczalny zarówno dla algorytmów opartych na analizie zdjęć o różnej rozdzielczości, algorytmów analizujących DEM terenu, jak również algorytmów analizujących linię widnokregu.

Obszarem poza współczesnymi badaniami tego typu algorytmów jest wykorzystanie zdjęć wielospektralnych. Obecnie algorytmy operują na zdjęciach panchromatycznych. Poprzez to nie jest możliwy odczyt z analiz typ materiałów, które są widoczne na zdjęciach. Rezultatem jest zatem konieczność poszukiwania na zdjęciach wykonanych przez łaziki jedynie kształtów podobnych do tych zobrazowanych przez satelity lub podczas opadania na powierzchnię. Zarówno krater, jak i łagodne wzgórza o ustalonej pozycji na mapach mogące być punktem odniesienia dla łazika wyglądają jednak na zdjęciach satelitarnych zupełnie inaczej niż z punktu widzenia kamer łazików umieszczonych co najwyżej 1,5 m nad powierzchnią planety. Rozwiązaniem mogłoby tu być zastosowanie punktów odniesienia o wiele mniejszych, mieszczących się na jednym zdjęciu wykonanym przez łazik. Niestety, obiekty te zazwyczaj nie są lub są słabo widoczne na zdjęciach satelitarnych Marsa. Zastąpienie metody polegającej obecnie na odszukiwaniu kształtów metodą porównującą typ terenu/obiektu (np. bazaltowy gład na piaszczystym terenie) wydaje się zatem słusznym podejściem, wymaga ono jednak opracowania algorytmu możliwego do zastosowania na komputerze łazika.

Podziękowania

Publikacja powstała dzięki współpracy z ośrodkiem ESTEC Europejskiej Agencji Kosmicznej, szczególnie z kierowanym przez dr. Giefranco Visentin Planetary Robotics Laboratory. Za pomoc dotyczącą tematyki GIS podziękowania składamy panu mgr. inż. Karolowi Rotchimmelowi z Zakładu Teledetekcji Instytutu Lotnictwa.

Bibliografia

1. Beeson N., *Spirit Traverse Map*, [http://marsrover.nasa.gov/mission/tm-spirit/images/MERA_A1506_2.jpg]
2. Beeson N., *Opportunity Traverse Map*, [http://marsrover.nasa.gov/mission/tm-opportunity/images/MERB_Sol2055_1.jpg]
3. Biesiadecki J.J., Maimone M.W., *The Mars Exploration Rover surface mobility flight software: Driving ambition*, "Proc. 2006 IEEE Aerospace Conference", DOI: 10.1109/AERO.2006.1655723.
4. Biesiadecki J.J., Maimone M.W., Morrison J., *The Athena SDM rover: A testbed for Mars rover mobility*, "Proc. International Symposium on Artificial Intelligence", Montreal, Canada, 2001.
5. Boukas E., Gasteratos A., Visentin G., *Localization of planetary exploration rovers with orbital imaging: a survey of approaches*, "Robotics and Automation Workshop: on Modelling, Estimation, Perception and Control of All Terrain Mobile Robots" (ICRA Workshop), 2014.
6. Cheng Y., Maimone M.W., Matthies L., *Visual odometry on the Mars exploration rovers*, "Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics", 2005.
7. Cooper B., *Driving on the surface of Mars using the Rover Control Workstation*, SpaceOps Conference International Conference on Space Operations, 1998.
8. Cozman F., Krotkov E., *Robot localization using a computer vision sextant*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, 106–111, DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525271.
9. Cozman F., Krotkov E., Guestrin C., *Outdoor visual position estimation for planetary rovers*, "Autonomous Robots", vol. 9, 2/2000, 135–150, DOI: 10.1023/A:1008966317408.
10. Czapski P., Kotlarz J., Kubiak K., Tkaczyk M., *Analiza czynnikowa zdjęć wielospektralnych*, „Prace Instytutu Lotnictwa”, 1/2014, 143–150.
11. D’Luna L.J., Frosini D.A., *VLSI Digital Signal Processing Chipset for Color Image Sensors*, *Electronic Imaging*, 1992.
12. Forsyth D.A., Ponce J., *Computer Vision: A modern approach*, Prentice Hall, 2003.
13. Li R., Squyres S.W., Arvidson R.E., Archinal B.A., et al *Initial results of rover localization and topographic mapping for the 2003 mars exploration rover mission*, "Photogrammetric engineering and remote sensing", Vol. 71, No. 10, 2005, 1129–1142.
14. Li R., Ma F., Xu F., Matthies L., Olson C., Xiong Y., *Large scale mars mapping and rover localization using escent and rover imagery*, "International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing", Vol. 33, part B4, 2000, 579–586.
15. Maimone M. et al., *Intelligence for Space Robotics*, 51–52.
16. Matthies L., Olson C., Tharp G., Laubach S., *Visual localization methods for mars rovers using lander, rover, and descent imagery*, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space (i-SAIRAS), Tokio, Japonia, 1997, 413–418.
17. Matthies L., Gat E., Harrison R., Wilcox B., Volpe R., Litwin T., *Mars microrover navigation: Performance evaluation and enhancement*, "Autonomous Robots", Vol. 2, 4/1995, 291–312, DOI: 10.1007/BF00710796.
18. Mishkin A.H., Morrison J.C., Nguyen T.T., Stone H.W., Cooper B.K., Wilcox B.H., *Experiences with operations and autonomy of the Mars Pathfinder Microrover*, „Proc. 1998 IEEE Aerospace Conference”, 337–351, DOI: 10.1109/AERO.1998.687920.
19. Perminov V.G., *The Difficult Road to Mars – A Brief History of Mars Exploration in the Soviet Union*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 1999, 34–60.
20. Stein F., Medioni G., *Map-based localization using the panoramic horizon*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 11, 6/1995, 892–896.
21. Van Pham B., Maligo A., Lacroix S., *Absolute map-based localization for a planetary rover*, 12th Symposium on Advanced Space Technologies and Automation in Robotics, May 2013, Noordwijk, Netherlands, 1–8.
22. Volpe R., *Navigation results from desert field tests of the Rocky 7 Mars rover prototype*, "International Journal of Robotic Research", Vol. 18, No. 7/1999, 669–683, DOI: 10.1177/02783649922066493.

23. Wilford J.N. (ed.), *Cosmic Dispatches: The New York Times Reports on Astronomy and Cosmology*, W.W. Norton & Company, 2002, 44–58.
24. Xu F., Ma F., Li R., Matthies L., Olson C., *Automatic generation of a hierarchical DEM for Mars rover navigation*, Proceedings of the 3rd Mobile Mapping Conference, Kair, Egypt 2001.
25. 'Lost' 2003 Mars Lander Found by Mars Reconnaissance Orbiter, [www.nasa.gov/jpl/lost-2003-mars-lander-found-by-mars-reconnaissance-orbiter/#.VPAXifmG9tg].

Mars Rovers Localisation Algorithms

Abstract: The current European Space Agency space programs assume the use of autonomous, mobile, equipped with advanced scientific instruments rovers on the Moon and Mars surfaces. Precise determination of position and orientation is one of the most important skills in such programs. During successive missions a number of image-processing algorithms for determining rover position were developed. The results showed that the algorithm able to determine precisely position in any type of a terrain and for any kind of conditions does not exist. Scientists and engineers from ESA's ESTEC are have been carrying out works on two different directions of algorithms development. First: algorithm that will be applicable to most of conditions on Mars, second: development of previous algorithms results validation methods (cross-validation, perhaps). In this paper we present navigation techniques in past Russian, European and US missions to the Mars and the most important image-processing algorithms for determining rover position. Our conclusions can be used as a guide for assumptions and conditions of the autonomous navigation experiment design.

Keywords: remote sensing algorithms, global positioning algorithms, Mars, rovers, autonomy, commanding, ground operations, telepresence

Jan Kotlarz

jan.kotlarz@ilot.edu.pl

Studiuje astronomię na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2012 roku pracuje w Zakładzie Teledetekcji Instytutu Lotnictwa. W 2009 r. został nominowany do nagrody Travelery przez National Geographic w kategorii naukowe osiągnięcie roku za stworzenie algorytmu generującego trójwymiarowe modele powierzchni Marsa na podstawie analiz topologicznych. Od 2013 r. kieruje projektem HESOFF.



dr Natalia Zalewska

natalia.zalewska@ilot.edu.pl

Pracuje w Instytucie Lotnictwa oraz Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, jest specjalistką w zakresie badań geologicznych Marsa, prowadzonych na podstawie danych z satelitów Mars Express i MRO. W 2005 r. brała udział w analogowej misji na tej planecie, zorganizowanej przez Mars Society, która odbywała się w bazie marsjańskiej na pustyni w stanie Utah. Obecnie zajmuje się zagadnieniami poszukiwania wody na powierzchni Marsa. Jest zaangażowana w popularyzację kosmosu przez współpracę z mediami.

