



Presented by **BHP**

robotika
international

Space Robotics Challenge Phase 2 (SRCP2)

Představení programu a řešení skupiny Robotika
František Brabec

Motivace NASA

- support human exploration of the solar system
- supply basic materials such as oxygen (O₂) and water (H₂O), food, propellants, and other materials (radiation shielding, clothing, etc.)
- farther from Earth and for greater periods of time



utilize local resources (such as those found in lunar regolith)

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150023468/downloads/20150023468.pdf>

Cíl soutěže SRCP2

- Autonomous robots operating on the surface of the moon
- Collecting and manufacturing useful materials
- A heterogeneous, multi-robot team to autonomously complete tasks envisioned for a lunar in-situ resource utilization (ISRU) mission
- Performing ISRU tasks with little to no human intervention needed
 - communication latencies
 - limited bandwidth
- Unique radiation and thermal environments
 - affect the processing and sensing capabilities available for robotic systems

Architektura soutěžního prostředí

- Simulované virtuální prostředí
- Open Robotics' Gazebo
- Robot Operating System (ROS)
- Ubuntu 20.04
- NVIDIA
- Docker



GAZEBO



Měsíční terminologie

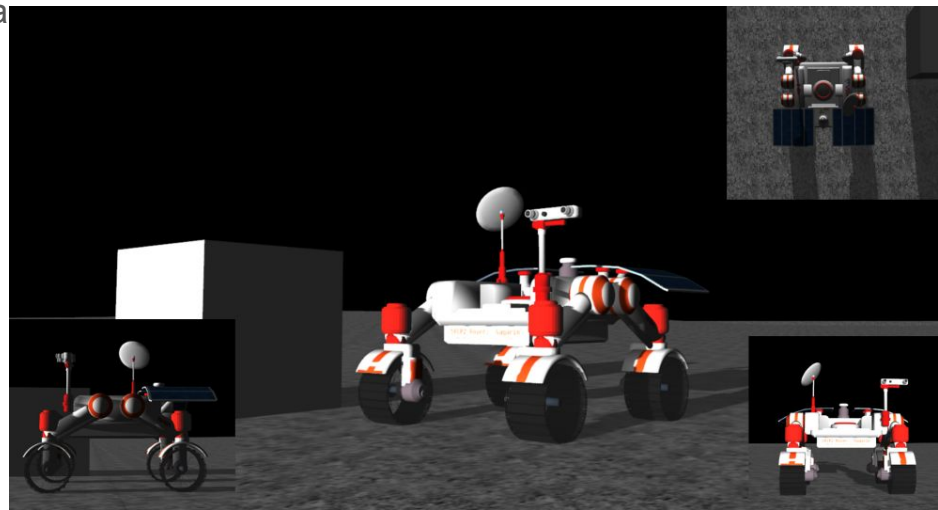
- Regolith - vrstva sypkého kamenného materiálu ležící na podloží, nemá pro NASA hodnotu
- Volatiles - 8 druhů uhlovodíků a dalších typů chemikálií skrývajících se pod povrchem
 - Led, etan, metan, metanol, oxid uhličitý, apod
 - Jsou potřebné pro udržení dlouhodobého pobytu
 - Výroba paliva, vody, dýchatelné atmosféry, apod

Soutěž a Pravidla

- Dvě kola
 - Kvalifikace
 - 3/2020 - 9/2020
 - max výhra \$15,000
 - 3 izolované úlohy, 1 hodina limit na každou
 - Soutěžní kolo
 - 1/2021-7/2021
 - max výhra \$185,000
 - 1 úloha, 2 hodiny limit
- Vyhlášení výsledků 9/2021
- Fully autonomous operations
- 3 pokusy, výsledné hodnocení je průměr dosažených bodů

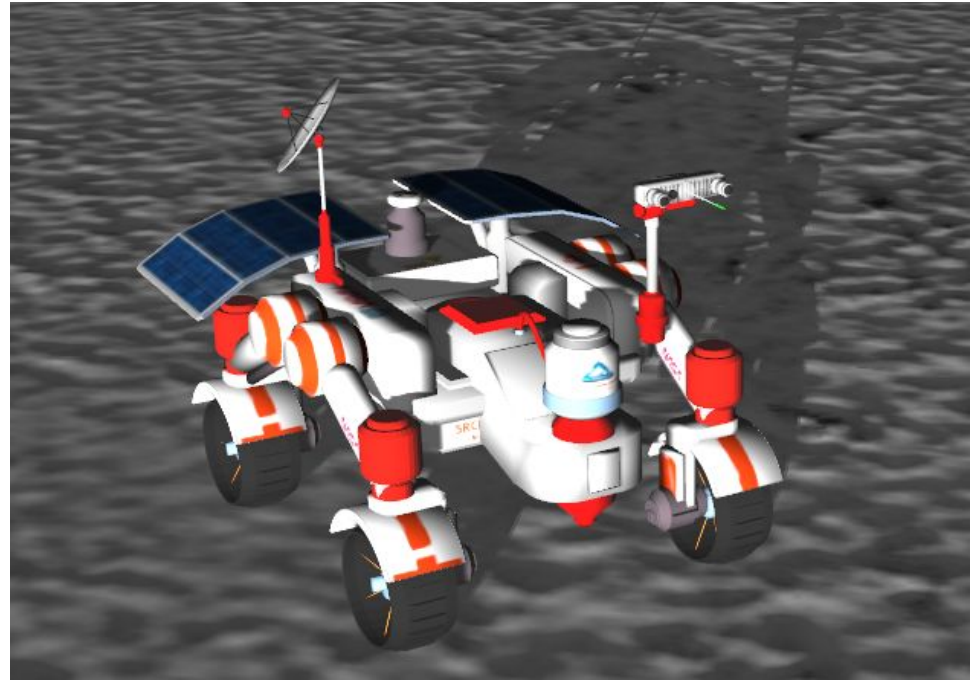
Robotické vybavení - společná platforma

- 1.5m dlouhý, 1.3m široký, 0.8m vysoký
- Four-wheeled
 - Each wheel can be independently steered, and independently driven.
- holonomic machine
 - Robot se může pohybovat podle všech degrees-of-freedom najednou
 - Lineárně dopředu-dozadu
 - Lineárně posun do strany vlevo-vpravo
 - Angulárně natáčení vlevo-vpravo
- passive suspension
- Sensor bar - natáčí se nahoru-dolu ($\max \pi/3$) a dokola
 - Stereo cameras (640x480)
 - 2D LIDAR (rozsah 2,6rad, 100 samples, 15m max)
 - Spot light
- Další vybavení
 - Battery level detection
 - encoders
 - IMU (6 DoF) - vhodné pro pitch, roll, yaw
 - Brzdy
 - Solární panel



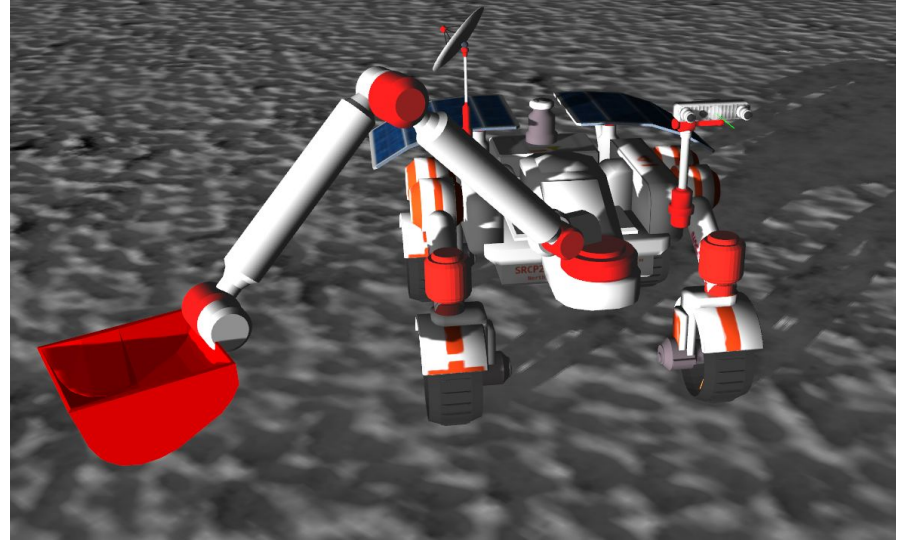
Dodatečné vybavení - scout

- Volatile sensor
- Připevněn na přídi společné platformy
- Hlásí výskyt volatile do 2m od pozice sensoru
- Výstup sensoru je 2D vzdálenost od volatile
- Max rychlost 1m/s



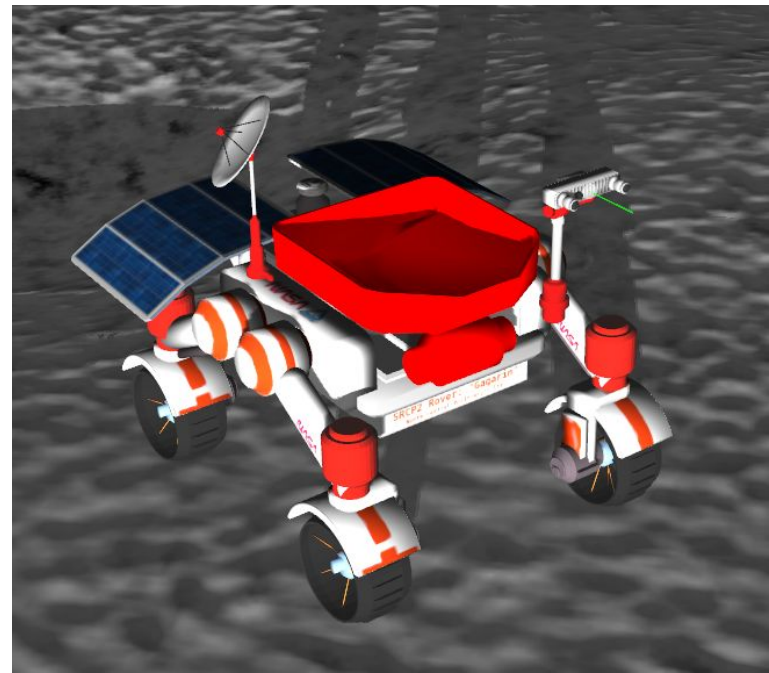
Dodatečné vybavení - excavator

- 4 DoF rypadlo
- Připevněno na přídi platformy
- 2 ramena, na konci naběradlo
- Otáčí se 360° dokola
- Pozor - některé kombinace stavů kloubů vedou ke kolizi
- Max rychlost 0.5m/s



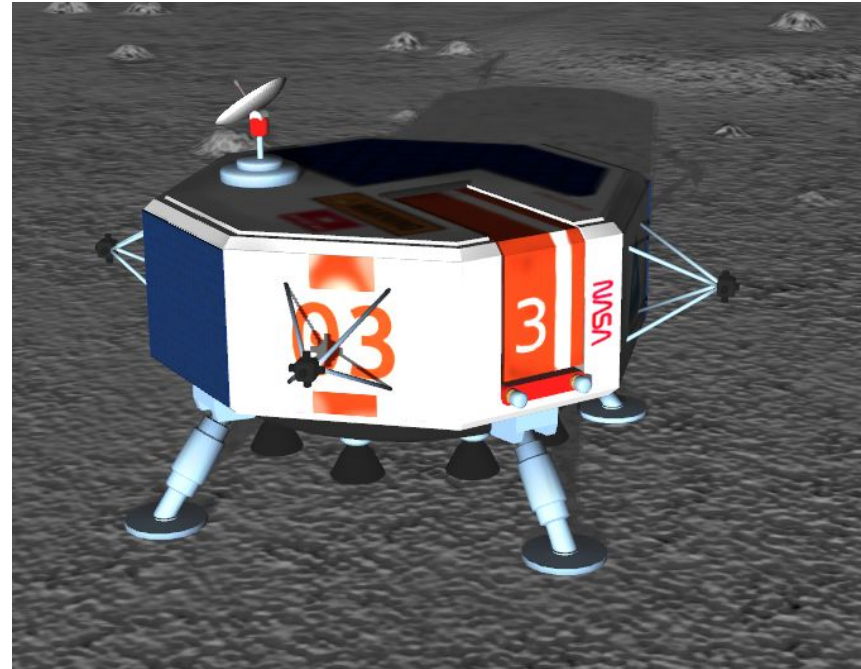
Dodatečné vybavení - hauler

- Obsahuje korbu
- Korbu lze naklánět pro vykládání
- Max rychlost 0.8m/s



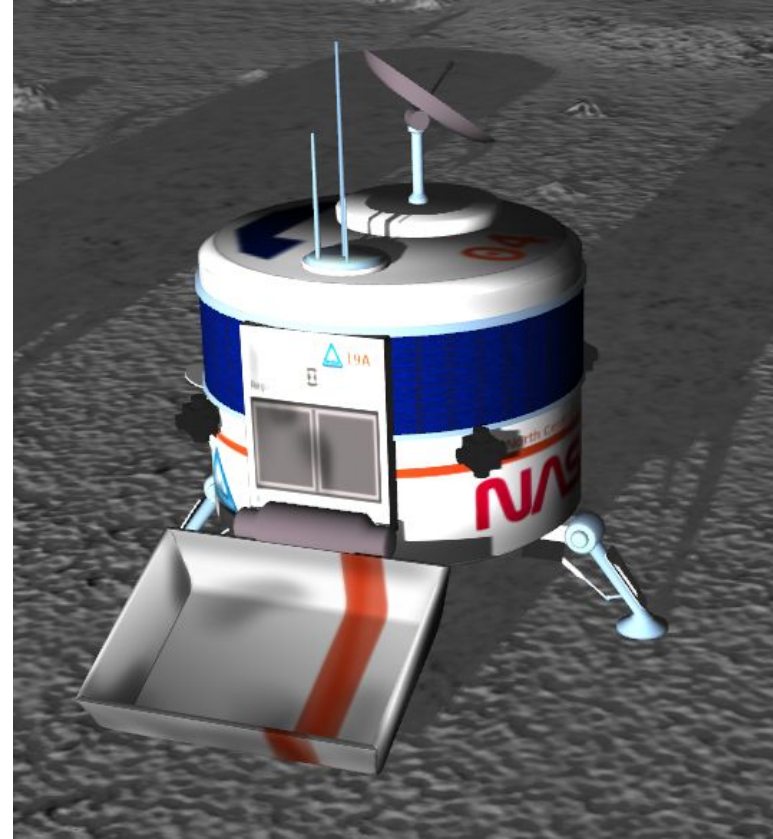
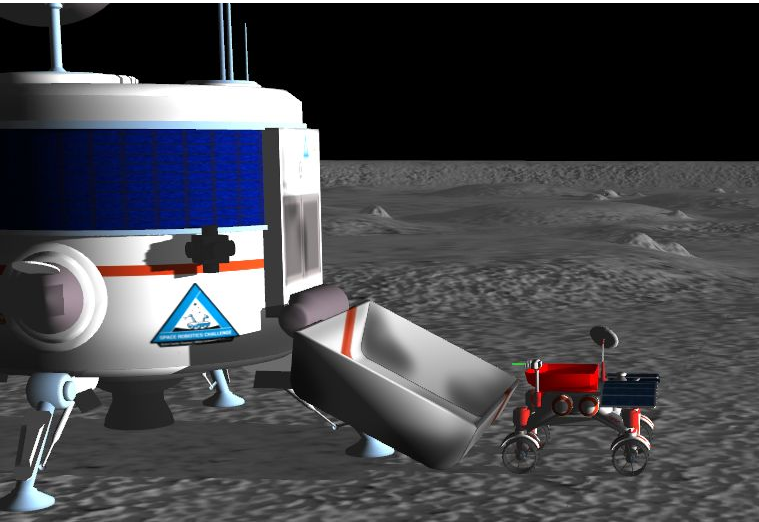
Další objekty - Recharge Station

- Pokud robot přijede dostatečně blízko, dobijí se mu během několika sekund baterie
- Za plného využití se baterie úplně vybije za cca 5 minut



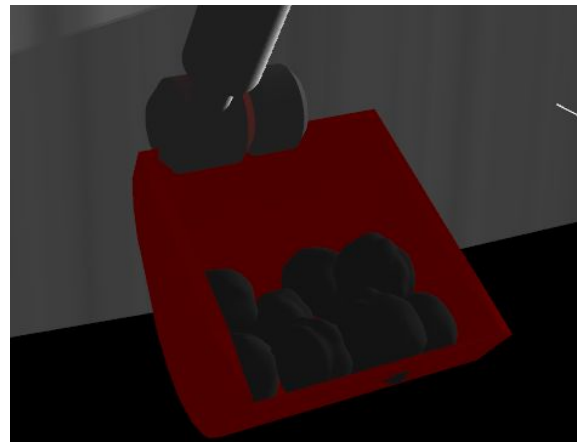
Další objekty - Processing Plant

- Obsahuje sběrný kontejner pro volatiles
- Soutěžící získává body doručením vytěžených volatiles do tohoto kontejneru



Simulace volatile

- Každé naleziště volatile je modelováno jako koule pod povrchem s poloměrem 2m
- Naběradlo excavatoru musí protnout 2D projekci této koule pod povrchem, aby se naplnilo buď regolithem nebo volatile nebo kombinací v závislosti na vzdálenosti kopání od centra volatile
- Vytěžené volatile je modelováno jako kulička, každé jednotlivé nabrání má ve výsledku 5-10 kuliček v naběradle (kombinace regolith a volatile)
- Kuličky volatile se pak chovají jako každý jiný objekt v simulaci, padají, přesypají se za jízdy, apod
- Jedno nabrání vyprodukuje maximálně 5 **volatile** kuliček v naběradle
- Minimálně je potřeba 5x rypadlem nabrat, než se volatile lokace plně vytěží



Kvalifikační úlohy

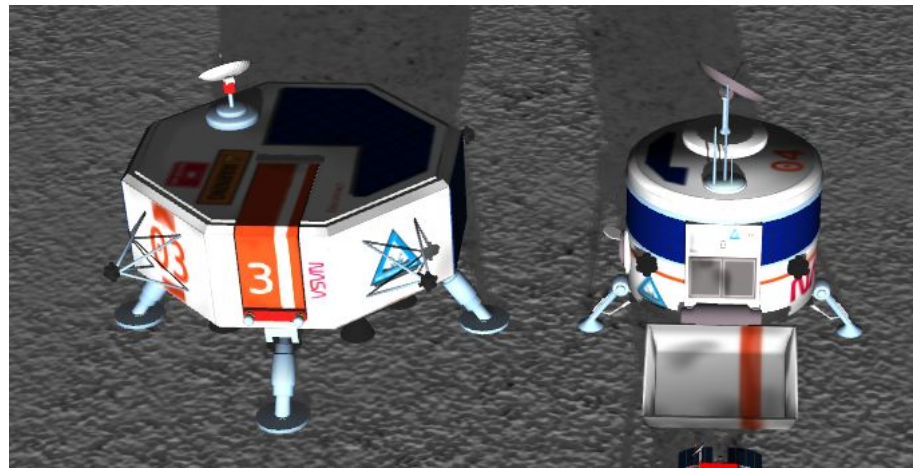
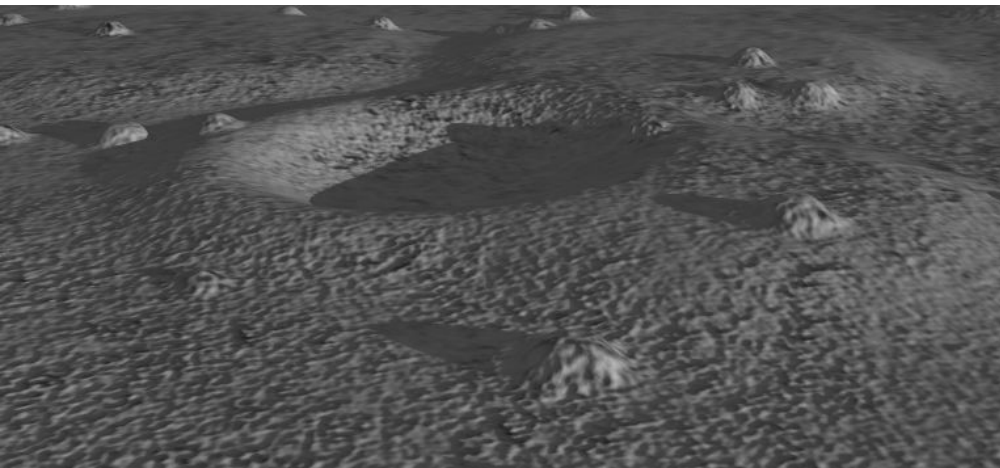


1. Locating resources and objects in a simulated lunar world
 - a. Scout má za úkol (systematicky) jezdit a hledat volatiles
 - b. Když volatile najde, nahlásí jeho X,Y polohu
 - c. Za každou správnou polohu (v rámci dané tolerance) jsou 2 body
2. Extracting resources from the regolith
 - a. Tým excavator a hauler obdrží seznam všech volatiles a jejich souřadnice
 - b. Cílem je k těmto volatiles dojet, vykopat je a naložit je do hauleru
 - c. Za každou naplněnou korbu je 1 bod
3. Navigating about the lunar simulation surface
 - a. Scout má za úkol nalézt stacionární satelit zavěšený ve výši 5-15m nad povrchem a nahlásit jeho 3D polohu (5 bodů)
 - b. Poté má za úkol dojet k processing station (5 bodů)
 - c. Nakonec má za úkol najít konkrétní oblast na processing station a postavit se před ní (3 body)

Z kvalifikace postoupilo 22 týmů (z cca 100 původně přihlášených), Robotika byl jeden z 6-ti ohodnocených maximální výhrou

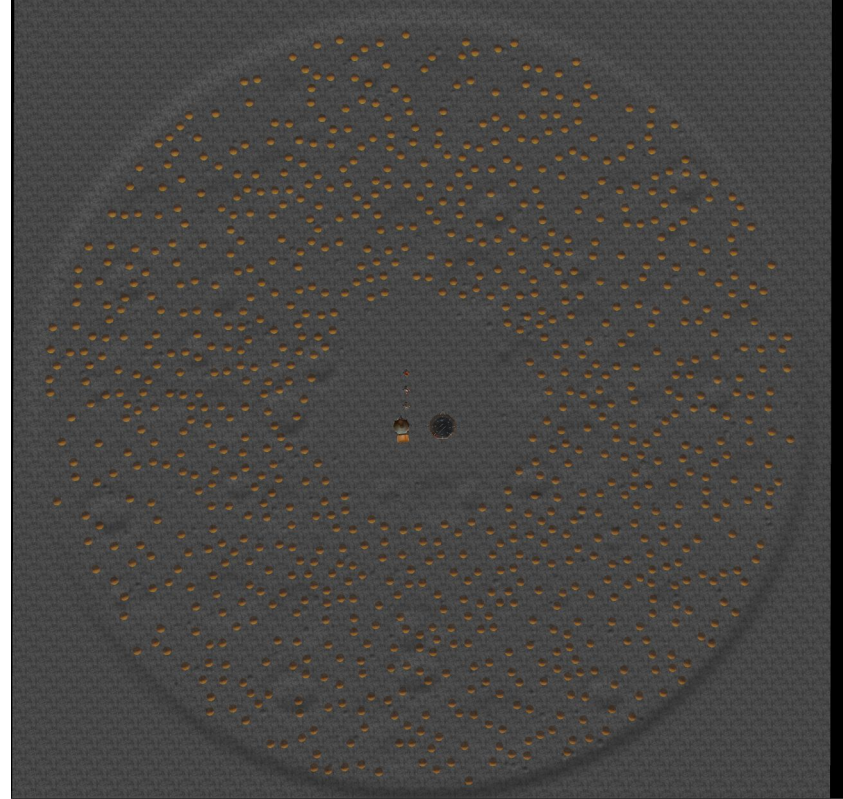
Soutěžní kolo - prostředí

- Je k dispozici max 6 robotů libovolných typů
- Svět je kruhová oblast o poloměru cca 100m
 - Náhodně generované krátery a výstupky různých velikostí
 - Středová oblast (cca průměr 15m) je bez nerovností
- Pozor - nízká gravitace (1.62m/s^2 vs 9.8m/s^2 na Zemi)
 - I zdánlivě minimální akcelerace hrozí překlopením, např nájezd ze strany na terénní nerovnost



Soutěžní kolo - Startovní pozice

- Cca 70 volatiles náhodně rozptýlených v mezikruží 28-90m poloměr
- Oba landery a všichni roboti začínají blízko středu
- Vzdálenost mezi landery je fixní 8m
- Každý robot si může jednou vyžádat svoji současnou polohu (Pose)



Soutěžní kolo - úkol

- Unifikovaná úloha zhruba odpovídající spojení všech kvalifikačních úloh dohromady
- Cílem je dopravit maximum volatiles do processing plant
- K tomu je potřeba
 - Hledat volatiles pomocí scout robota
 - Volatiles vykopat excavátorem, naložit do haulera a nechat odvézt do processing plantu
 - Toto pokud možno efektivně opakovat po dobu 2 hodin a maximalizovat množství dovezených volatiles a tedy počet dosažených bodů
- Roboti mají baterie které se při aktivitách vybíjejí, lze dobít
 - Rychle u recharge station
 - Pomalu z vlastních solárních panelů

Komponenty řešení

1. Celková strategie

- a. Kolik jakých robotů, způsob jejich spolupráce

2. Systematický průzkum

- a. Cleaning patterns, space filling curves

3. Udržování pozice

- a. Odometrie (z kol)
- b. Vizualní odometrie
- c. IMU

4. Koordinace lokace robotů

- a. Jak zajistit, aby excavator kopal v místě, které označí scout jako výskyt volatile

5. Filtrování šumu v senzorech

6. Nakládání

- a. Vzájemná pozice excavatora a haulera
- b. Terénní nerovnosti v oblasti nakládání

7. Image recognition

- a. Je potřeba vidět/rozpoznat objekty jako processing plant, jiné roboty, apod

8. Zabránění kolizím

- a. Detekce překážek (statické, mobilní)

9. Převod požadovaného pohybu na příkazy motorům

10. Power management

Celková strategie

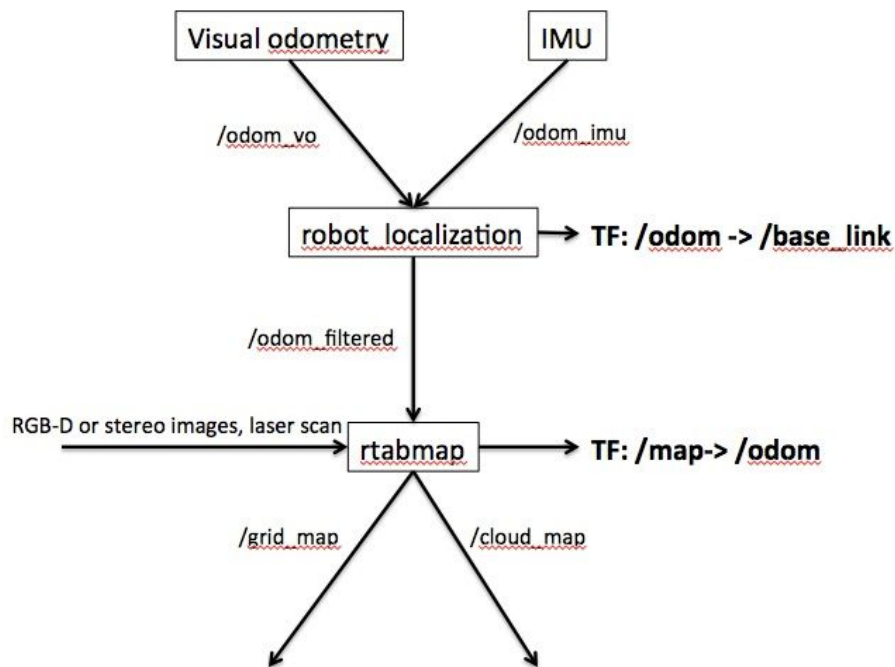
- Max 6 robotů
 - 2 typy od každého a 2 nezávislé týmy řešící půlku světa
 - redundance
 - 1 scout, 2 excavatory, 3 haulery
 - Vše závisí na jednom scoutu - weakest link
 - 3 haulery mohou odvážet volatiles rychleji
- Předávání informace o volatiles od scout do excavator+hauler
 - Souřadnice - jsou dostatečně přesné? Efektivita kopání se snižuje se vzdáleností od centra volatile
 - Fyzické následování - větší overhead když roboti na sebe více navzájem čekají
- Dobíjení
 - Recharge station je rychlejší ale trvá tam déle dojet
 - Statická strategie (vždy dělej to samé) nebo dynamicky počítej lepší volbu pro danou pozici a typ robota
 - Preventivní dobíjení nebo as-needed?
- Zvažuj nejen efektivitu (kdyby vše fungovalo tak jak má), ale i rizika
 - Každý další ujetý metr zvyšuje riziko, že bude problém

Systematický průzkum

- Typická uklízeč úloha
 - Je potřeba projet ideálně celou oblast, ale každé místo ideálně jen jednou
- Odlišnosti
 - Neočekává se, že bude časově možné vykopat všechny volatiles, tj je ok některé oblasti přeskočit
 - Je potřeba kopat volatiles v takovém pořadí, aby se minimalizovalo cestování pomalého excavatoru (potenciální bottleneck celého řešení)
 - Dvě možnosti
 - i. Nejprve nalézt několik (v limitě všechny) volatiles, pak teprve vypočítat optimalizovanou trasu excavatora
 - ii. Kopat v pořadí v jakém jsou volatiles nalezeny
 - Pak plánuj trajektorii scouta tak, aby brala v potaz omezenou rychlost excavatora
- Potenciální trajektorie
 - Paralelní pruhy
 - Soustředné kružnice
 - Space-filling curve (Hilbert, Sierpiński)
 - Celá oblast se rozdělí na menší segmenty a každý se řeší zvlášť případně jinak

Udržování pozice

- ROS moduly *robot_localization* a *rtabmap*
- *robot_localization* fúzuje data z několika zdrojů pro výpočet nejlepšího odhadu odometrie
 - Vizuální odometrie
 - *rtabmap* ze stereo kamer
 - Odometrie z kol počítaná z encoderů
 - IMU
 - Výhradně pro udržování yaw
- *rtabmap* dělá SLAM z odometrie a kamer
- Maximální odchylka za celý běh: 3-4m
 - Dostatečné pro systematické pokrytí
 - Nedostatečné pro kopání na správném místě
- Pohybující se objekty v hledáčku znepřesňují vizuální odometrii



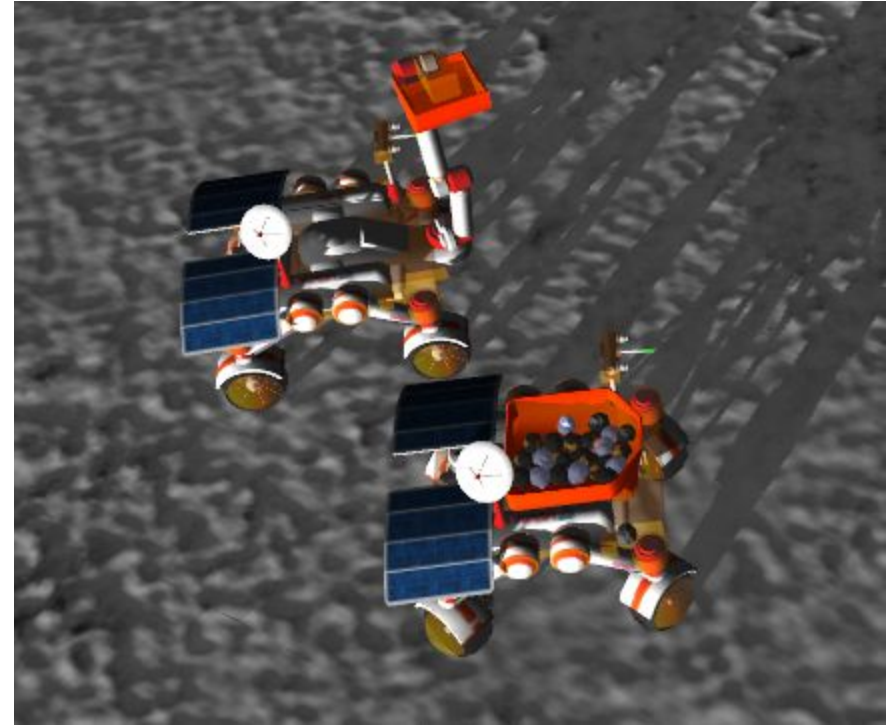
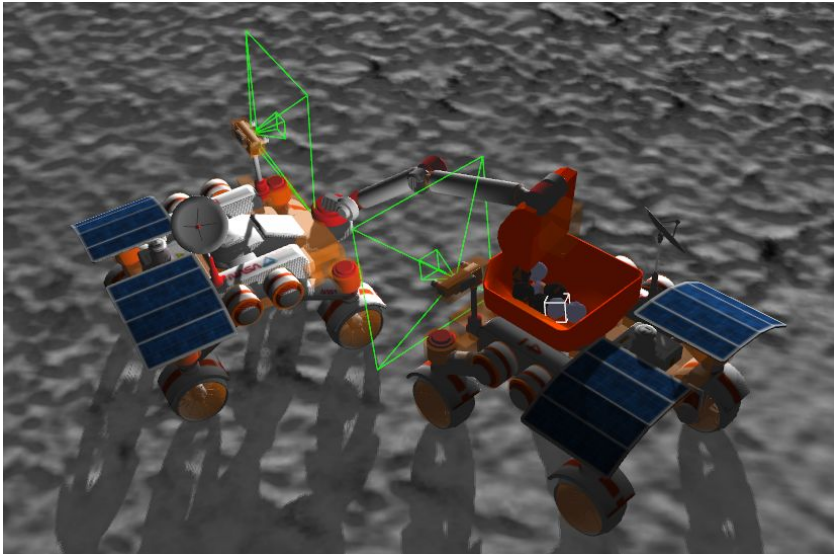
Filtrování vstupů

- Vesmírná radiace zanáší šum to některých vstupů
- Image
 - Šum jsou různobarevné pixely v celém obrázku
 - Pro malou oblast v horní části obrázku (obvykle černá obloha) vytvoř rozostřenou variantu (median blur)
 - Pak vypočítej standard deviation (odchylku) pro originální a rozostřený obrázek
 - Pokud rozdíl obou deviací větší než limit, ignoruj tento frame (ignoruj max 1 z 3 posloupných frames)
- IMU
 - Quaternion averaging over 3 readings
- Laser
 - Median over 5 readings



Nakládání

- Excavator musí být schopen
 - Kopnout pod povrch v předpokládané lokalitě volatile
 - Vysypat nabraný materiál do hauler korby
- Excavator pouze detekuje jestli naběradlo obsahuje regolith a volatile, poměr nebo množství není známo
- Hauler nemá informaci co nebo kolik toho je v korbě

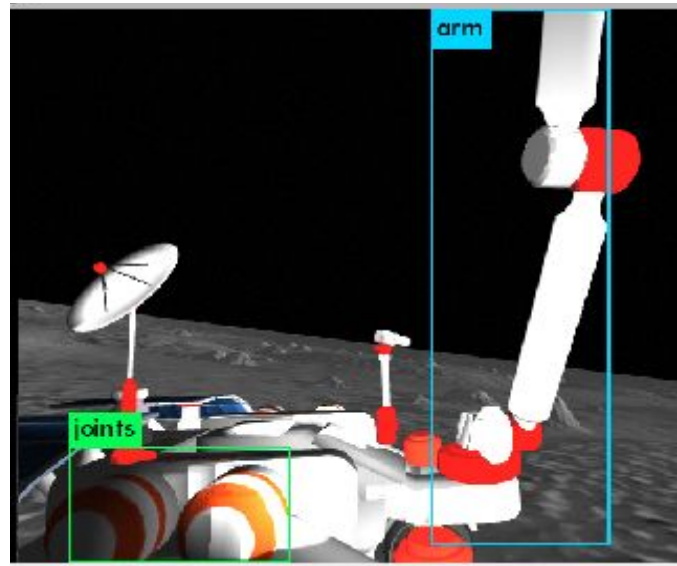


Vykládání

- Lokalizuj processing plant
 - YOLO
- Visuálně jed' za processing plant
 - Dokud nedojedeš do určité vzdálenosti
- Začni bokem objíždět processing plant
 - Dokud před sebou neuvidíš kontejner
- Jed' na doraz ke konktejneru a vysyp korbu

Image recognition

- Hodně funkcí v řešení je založených na vizuálním vstupu
 - Např rozhlédni se a když vidíš processing plant, jed' k němu
- Machine learning
 - 6 typů objektů (rover, processing plant, recharge station, excavator arm, processing plant hopper, robot joints (center of the base robot platform))
 - Annotation and training (cca 1000 image training set)
- YOLOv3 for inference
- 6 robots, 10Hz each - 60 frames/sec ale v simulovaném čase
 - Real Time Factor max 0.5
 - darknet/yolov3 na NVIDIA GTX 3070 8GB snadno stíhá

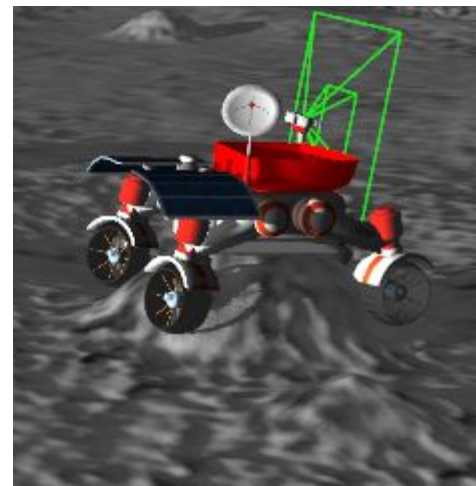
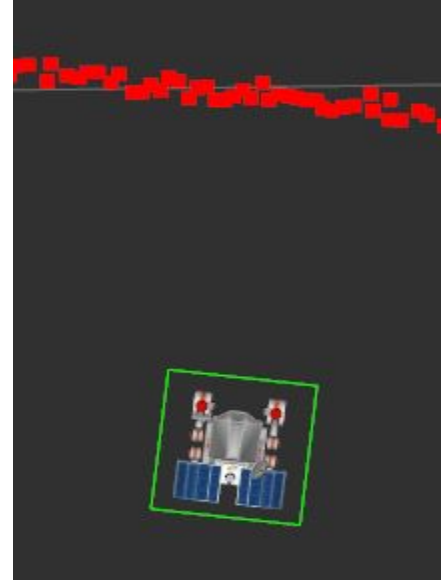


Zabránění kolizím - terén a objekty

- ROS module costmap_2d + plugins
 - obstacle layer
 - inflation layer - nafoukne detekované body a vytvoří tak spojitou kolizní oblast
- Detection based on inputs:
 - Lidar
 - object recognition (YOLO)
- Convert detections into artificial LaserScan topics fed into costmap
- Nepoužíváme PointCloud - výpočetně náročný, obtížná konfigurace pro rozlišení přejitelných terénních nerovností vs. skutečná překážka při jízdě na nerovném terénu

Zabránění kolizím - terén

- Pokud možno se vyhýbat nárazům do/přejezdům přes boule
 - Riziko převrácení, zneřádnění odometrie
- Lehce skloň lidar a udržuj konstantní median vzdálenost (4m)
 - Pokud je terén plochý, průsečík roviny Lidaru a roviny terénu je přímka, tj rovná čára ~4m před robotem
 - Pokud není terén plochý, křivka průsečíku se začne od přímky odlišovat
- Hledej odchylky od této rovné čáry - custom lidar filters
 - Menší boule - hledej lokální extrémy - vzdálenost jednoho paprsku je více než X v porovnání se sousedním paprskem a současně o pár paprsků dál je k vidění opak
 - i. Minimum false positives ale nenajde větší/bližší překážky
 - Hledej větší boule - vzdálenost se sníží a zase navýší pozvolna, během několika paprsků
 - i. Prolož přímku každými sousedními 5ti paprsky, porovnávej spádnice
 - ii. Spádnice přes 45° jedním směrem a nedaleko opačným směrem indikuje větší bouli (ale i false positives)
 - iii. Tento tvar je problém pouze hodně blízko, pokud je toto detekováno v dálce, jedná se spíše o plynulou a přejitelnou terénní nerovnost



Zabránění kolizím - objekty

- YOLOv3 identifikuje všechny objekty (tj ne-terén)
- Velikost objektů je známá
 - Odhadujeme vzdálenost podle velikosti YOLOv3 bounding box
 - Objekt který je pouze částečně viditelný bude vypadat, že je dál
 - Naštěstí vzdálenost nás většinou zajímá pro objekty přímo před robotem
- Lidar není vhodný protože je zaměřen směrem dolů pro potřebu zabránění kolizím s terénními nerovnostmi
 - Landers stojí na úzkých nohách
 - Roboti také mají malou souvislou plochu o kterou by se 2D lidar mohl odrážet
 - Při jízdě po nerovnostech není jisté, že Lidar se bude dívat směrem, kde protíná a nalezne objekt
 - Naopak je potřeba ignorovat terén, protože prostá vzdálenost neurčí, jestli je terén přejitelný
- Vytváříme virtuální LaserScan topic
 - Úhly odpovídající vnitřku bounding boxes jsou ohodnoceny odhadnutou vzdáleností objektu v bounding boxu
 - Úhly mimo bounding boxy jsou ohodnoceny max vzdáleností
 - Výsledný LaserScan topic je použit jako vstup do costmap_2d obstacle layer

Převod požadovaného pohybu na příkazy motorům

- Všechna 4 kola nezávisle natáčená a poháněná
- Natáčení -180° - 180° , pohon dopředu i dozadu
- Swerve driving ROS node
 - Převádí požadované standardní ROS Twist (linear x a y a angular z) na 8 příkazů pro kola
 - 4x úhel a 4x rychlost
 - Počítá odometrii
 - Z úhlů a rychlostí jednotlivých kol z enkodérů počítá pohyb celého robota ve formátu Twist
 - Vstup do *robot_localization*
- Když chceme dosáhnout určitý pohyb celého robota, co má přednost
 - úhel natočení kol
 - směr otáčení kol (dopředu/dozadu)
 - Např: pokud chceme jet stranou doleva, můžeme buď natočit kola 90° doleva a jet dopředu nebo 90° doprava a jet dozadu
 - Asi záleží na kontextu, co se očekává dál

Power management

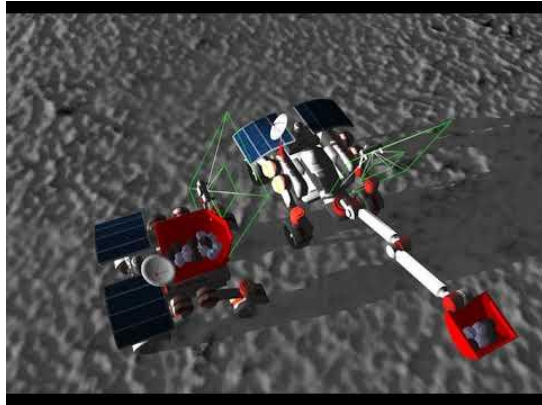
- **Recharge module**
 - Stačí přijet cca 2m blízko a rover se nabije na maximum za 2-3 sekundy
 - Pokud robot pracuje ve vzdálenějších oblastech, může trvat dost dlouho dojet tam a zpět
- **Onboard solar panels**
 - Pomalé nabíjení (řádově minuty na maximum)
 - Robot musí být natočen panely proti slunci a nic jiného nedělat
- **Power saving mode**
 - Když robot nic nedělá, stále má spotřebu, je potřeba přepnout do power saving mode
- **Když baterie klesne pod 25%, přestane fungovat:**
 - Sensor bar spadne (kamera, lidar se dívají do země)
 - Volatile sensor
 - Joints (naběradlo, korba, zmenší se úhel natáčení kol)
 - Zmenší se max rychlost
 - V praxi to pravděpodobně znamená, že robot není k ničemu použitelný (možná jako stacionární objekt pro podporu navigace ostatních)
- **Strategie**
 - Pokud čekáš, natoč se proti slunci a nech se dobíjet
 - Pokud baterie klesne pod 40%, začni se jet nechat dobít u recharge station
 - Pokud baterie (tj za jízdy) klesne pod 28%, zastav, natoč se ke slunci a nech se dobít na 35%, pak pokračuj k recharge station

Otevřené problémy

- Prioritou je spolehlivost
 - Pracovat nepřetržitě celé 2 hodiny
 - Předpokládáme lepší výsledky než u efektivnějšího, komplikovanějšího a tedy více rizikového řešení
- Pohybující-se objekty v zorném poli ruší VSLAM
- Optimální celková strategie
 - Roboti čekají nebo jezdí preventivně tam kde se předpokládá, že budou potřeba?
 - Ovlivňuje dobíjecí strategii
 - Potenciálně ruší VSLAM
 - Kdy a jak dobíjet
 - V jakém pořadí kopat volatiles
- Nalezené volatile může být špatně přístupné pro normální nakládací sekvenci
- Okolí volatile může být na nerovném terénu
 - Těžící-nakládací sekvence nemusí fungovat když např hauler je 0,5m výše než hauler nebo jsou jinak nakloněni
 - Optimalizace pohybu ramene
- Optimalizace swerve driving
 - Více natáčet nebo více měnit směr dopředu/dozadu?
 - Kdy se rozjet dokud se kola ještě natáčí do požadovaného úhlu?
- Testování
 - Dlouhodobé automatické testy
 - Efektivní logování pro správné pochopení problému

Demo, otázky a diskuse

YouTube demo: <https://youtu.be/KUel0IZxkAw>



robotika
international

frantisek.brabec@robotika-intl.com

<http://robotika-intl.com/>

@RobotikaIntl