

RADOSŁAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ

The Kalman autonomous planetary rover

The project presented in the article is proof of the usefulness of student organizations and its effectiveness in the popularization of advanced technologies as well as future solutions in industry. A student-developed planetary rover, using a Kalman filter and other algorithms responsible for dynamic terrain mapping and pathfinding, is capable of non-collision movement in the most challenging environments. Moreover, the rover uses a 6DOF arm developed by students to undertake manual actions, such as soil sampling or maintenance tasks with ease. The invention is provided with a drill to be capable of extracting a sample from a depth of 30 cm, which is expected to greatly enhance the research of the geological history of the surveyed region. The robot has been tested numerous times at planetary rover competitions with success, proving the potential of such platforms as one of starting points in space exploration and opportunities in industrial use, especially in hard-to-reach mining areas. The featured project represents an inspiration for future young engineers and scientists by opening perspectives for implementing similar technologies for more efficient and safer operations in industry.

Key words: rover, robot, autonomy, mechanization, mining

1. INTELLIGENT PROCESSES

In the context of robotics, an intelligent process refers to the capabilities of a robot or a robotic system in terms of autonomous decision-making, information processing, learning from the experience and adapting to changing conditions. Intelligent processes in robotics cover a variety of advanced features, which enables robots to fulfil complex tasks, interact with the environment and humans, as well as improving their abilities. Below are a few examples of intelligent processes in a context of robotics:

- Movement planning: Robots use movement planning algorithms to plan optimal routes and avoid collisions when moving in an environment.
- Computer vision: Robotic systems use machine vision techniques, such as image recognition and scene analysis, in order to identify objects, humans as well as read road signs.

- Adaptive control: Robots can adjust own actions to changing conditions, e.g. respond to unexpected obstacles or new tasks.
- Machine learning: Robots learn from experience, gathering data from their surroundings and using it to perfect their own abilities to make more intelligent decisions.
- Human-robot interaction: Robots utilize speech and emotion recognition technology to better communicate and cooperate with humans.
- Autonomy: Autonomous robots are capable of independent actions without constant human supervision, making decisions in real-time based on data gathered from sensors.

The aim of intelligent processes in robotics is to increase the efficiency, safety, and utility of robots, by enabling more advanced tasks for them which would be impossible to achieve by standard, programmed machines. However, at the same time, they

need advanced technology, algorithms, and proper safety guarantees to prevent any potential unpredictable behaviour of the robots.

1.1. Macrocams and visual analysis

There are a variety of cameras on board the rover, including ones that are dedicated to autonomous driving, analogue and digital cameras which are used at the time of remote manual control over the rover driving, as well as cameras that allow close-up images to be obtained [1]. The observation of a rock under magnification is sometimes a key element to its identification. The ability to specify rock characteristics has significance in estimating regional mining potential. For this purpose, on board the Arducam IMX298 MIPI 16MP macrocam is used, which enables the observation of rocks at substantial zoom levels and saving results in the form of pictures. The macrocam works the best at a distance of 6–10 cm, giving significant magnification while preserving sufficient material quality.

MS Learns platform offers a free course using data from NASA to learn how to develop an artificial intelligence network to recognize rock samples [2]. The course allows participants to acquire geological data analysis skills, imaging processing, and machine learning techniques, which can find a use in supporting op-

erations conducted on Earth and in space. It brought new opportunities for the Kalman rover project, since such a network would allow the real-time detection of objects of higher interest. This would allow the rover to notify operators as to whether it had found anything interesting in surveyed location, as well as record timestamps in the footage itself for later human analysis of the recording fragments. This would be especially useful during various competitions when it is necessary to analyse the collected research material in a limited time. That is why the Science team, independently of the Software team, took the course for the acquisition of new skills and the implementation of its own neural network.

1.2. Trajectory and inversed kinematics

The automatization of sample collection is a critical element in branches such as geological surveys or space exploration. One advanced approach in that area is the use of programmed trajectories. This depends on a pre-defined movement path for the device collecting samples, for example, a planetary rover manipulator. Thanks to programmed trajectories, precise movement control, and sample collection, location determination is possible, which minimizes risks of damaging or losing samples.

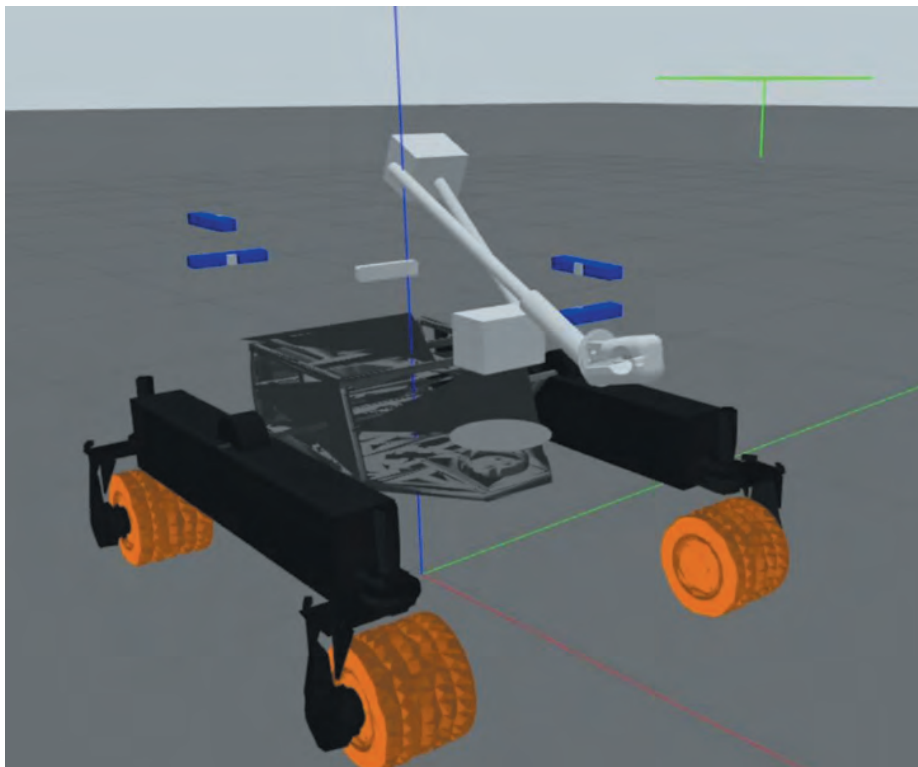


Fig 1. Model of a rover in the app of ground station, visualizing status of individual elements in the space

Inversed kinematics is an indispensable element of programmed trajectories implementation. It is a mathematical mechanism allowing the determination of an appropriate location and the orientation of various elements of the manipulator with the aim of reaching final position. In the case of sample collection, inversed kinematics provides a determination of the adequate gripper or tool settings to aptly place it where sample will be collected.

By using programmed trajectories and inversed kinematics, the automatization of sample collection is becoming more efficient, precise, and effective. It not only accelerates sample collection process, but also allows for safe and accurate acquisition of information, which are essential for scientific research and space exploration, in a way which is more effective and advanced technologically. A screenshot from the app to control the robot remotely, on which simplified model of the rover undertaking operation with trajectories of the arm, is visible on Figure 1.

1.3. Distributed intelligence

Distributed intelligence is often applied in the context of complex systems such as communities of organisms, groups of people, and also in the field of technology, in robotics and artificial intelligence. In such systems, intelligence arises from the interaction and collaboration of multiple elements that together create an organized and intelligent system. In the field of technology, distributed intelligence can refer to the cooperation of multiple robots to accomplish complex tasks. Each robot may have its own limited capabilities, but as a group, they can effectively complete a task that would be unattainable individually. The Kalman planetary rover is a robot with advanced construction that allows it to navigate challenging terrain. The rover can move between different waypoints, including geological objects such as rocks or obstacles like poles and stakes. During the traverse, data is collected in the form of GPS coordinates. If Kalman were actually being used as a planetary rover, there would be an opportunity to gather data obtained from the rover's onboard sensors along with data from orbiters. Combining data from orbiters and Kalman's onboard data using artificial intelligence algorithms would enable the better processing of the information, leading to more detailed geological interpretations of the region, especially concerning the precise mapping of its surface. The Kalman rover uti-

lizes tools such as GPS, encoders, and depth cameras. During actual missions, it would be valuable to expand this toolset by adding elements that would make signal triangulation and detection of the sun's position possible. Sun position monitoring could serve as a safety feature for the rover. For instance, if there ever were any communication issues, the rover could use the sun's position to determine its current location and relay that information to the ground station. This would aid in locating the rover in the case of any malfunction or loss of communication. If the unit would leverage photovoltaic panels for charging, sun position detection could allow for optimal positioning of the panels to efficiently capture solar energy and extend the operational capabilities of the vehicle. Additionally, if the rover has to travel at a significant distance from the ground station or other communication endpoint, radio signal triangulation would help to precisely determine the direction from which the transmission originates. This would allow for better connectivity and improve communication quality.

2. EXCAVATING ABILITIES

2.1. Gripper

The main concept in the Kalman planetary rover project is application of modularity. For the purpose of the realization of various tasks, the rover is equipped with several types of jaws, which are mounted on a manipulator and the choice of them is adjusted to the specific tasks the rover is expected to perform. For precise operations, the special gripper is used, featuring shaped tabs which prove to be useful for carrying objects or performing easy maintenance tasks, such as unscrewing or screwing valves. Models of overlays in use with the ready gripper module are presented in Figure 2 [3].

The set of jaws used for excavating purposes has also been designed in a unique way. The design of those jaws makes it possible to obtain soil samples and after that, thanks to the tight connection of the upper and bottom jaws, the transfer of the sample to a mobile lab or special container intended for storage is feasible. Such flexibility and functionality of the modular jaws greatly enhances the universality of the Kalman rover, enabling the successful completion of various missions on a planet surface.

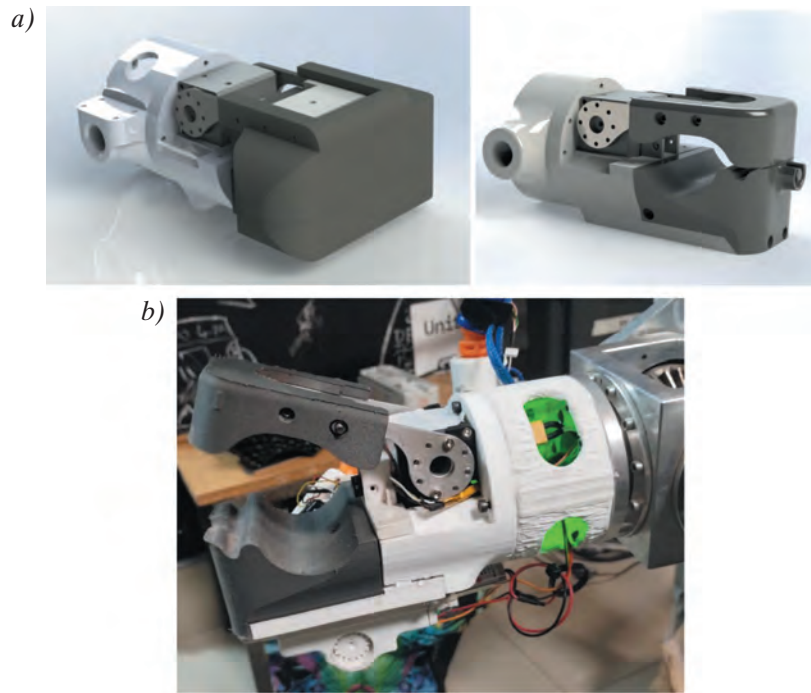


Fig. 2. Models (a) and assembled gripper (b)

2.2. Arm

Since it implemented a new mechanical 6DOF arm, the Kalman planetary rover gained the ability to work in two modes: autonomously and via remote control. The new arm offers significantly higher precision in task performance thanks to 6 degrees of freedom of movement. Equipped with cameras, it enables the rover to undertake the efficient observation of ob-

jects in its vicinity. A special advantage of the 6DOF arm is its large scale of operations and reach, which makes observation and sampling from less accessible places easier for the rover. The robot arm is becoming an invaluable tool to support repair operations, thereby increasing the functional value and the efficiency of the operations of the Kalman rover [3]. In Figure 3 a model of the arm currently in use is presented.



Fig. 3. Arm 6DOF currently in use

2.3. Drill

The drive system used in this project was inspired and adjusted directly from solutions available on the market, and its design includes several key components. The core of the drive is a DC brush motor with 18 V voltage. Besides that, planetary gear combined with a safety (ball) coupling is installed and the combination of those two elements ensures reliable functioning of the system. A mechanism of rack and pinion was used to achieve vertical movement. Such mechanism is propelled by the DC drive, which was mounted with the planetary gear and ensures smooth and efficient functioning. Additionally, special rails have been used to stabilize mechanism movement, which allows smooth and controlled lowering. The whole drive system was carefully adapted and optimized to not only provide high performance, but also the safety and stability of operations. Due to the functioning of the components from previously used devices, as well as precise mechanical solutions, this

drive unit is not only an efficient tool but also an excellent example of the adaptation of existing technology to new uses.

The current drill model has been developed to meet the requirements of new European Rover Challenge rules, during which the rover should have the capability of obtaining a sample from a depth of more than 30 cm. The Mars regolith analogue expected during the competition makes it vital that subsequent prototypes will not only be tested for the ability to drill, but also for durability of the materials and elements used, in order to securely store the retrieved core at the end of the operation. The mechanism of the drill as well as core auger is shown in Figure 4.

The implementation of 3D printing allows fast prototyping of further iterations of an auger for applications of new forms improving the functioning. When a specific model meets expectations in terms of overall performance, the manufacture of components from more durable materials, such as steel, follows.

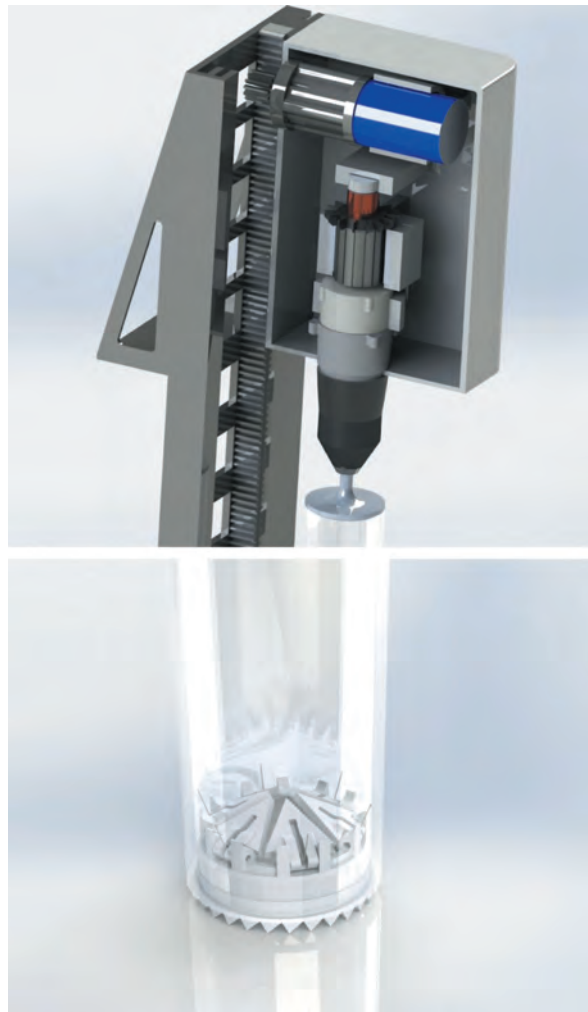


Fig. 4. Models of current versions of the mechanisms of the drill and core tube

3. AUTONOMY

3.1. Robot localization

The Kalman rover was named to honour Rudolf Kalman, inventor of the Kalman filter, an algorithm which has been in use in robotics extensively since the 1960's. The Kalman filter helps with robot's sensor readings denoising and predicting its status at any moment in time. The Kalman rover utilizes that algorithm to multiply the efficiency of odometry, which is a subsystem measuring changes in repositioning and determining its position in space. Kalman odometry is based on a GPS module and IMU containing gyroscope and accelerometer. These instrument readings are compared with the results of visual odometry, which measures the robot's movement based on imagery from cameras placed around its hull. All of the gathered data is combined, which, with the help of the Kalman filter, gives highly accurate information about the rover's position with millimetre-level accuracy.

3.2. Terrain mapping

Martian landscapes are full of boulders, steep cliffs, and craters. Such difficult environments pose a challenge for planetary rovers like Kalman. Rovers

would not be able to traverse autonomously without the use of any cameras and environmental sensors. Therefore, Kalman is equipped with a set of electronic "eyes" in the form of Intel RealSense depth cameras that operate simultaneously as standard cameras and also in a manner akin to a LIDAR scanner. RealSense cameras use stereoscopic vision, which means that they feature two infrared sensors located on both ends of them. Through them, cameras extract the depth of the image viewed in a way that is similar to human vision [4].

Information about depth sent by the cameras are represented as a point cloud, where every "pixel" in the image frame corresponds to one vertex in the cloud. Unfortunately, such a data format contains a lot of redundant information and does not allow us to determine with ease in which directions Kalman is able to drive. For this reason, autonomic Kalman algorithms convert the data stream from the cameras to extract only those features our rover is concerned with from the detailed point cloud, namely whether or not an obstacle is present in a particular location. Kalman, along with the course of the traverse, repeats the point cloud analysis multiple times and saves inaccessible areas in a so-called cost-map, a two-dimensional matrix that stores the structure of the surroundings visible from an aerial perspective around the rover. A visualized point cloud is included in Figure 5.

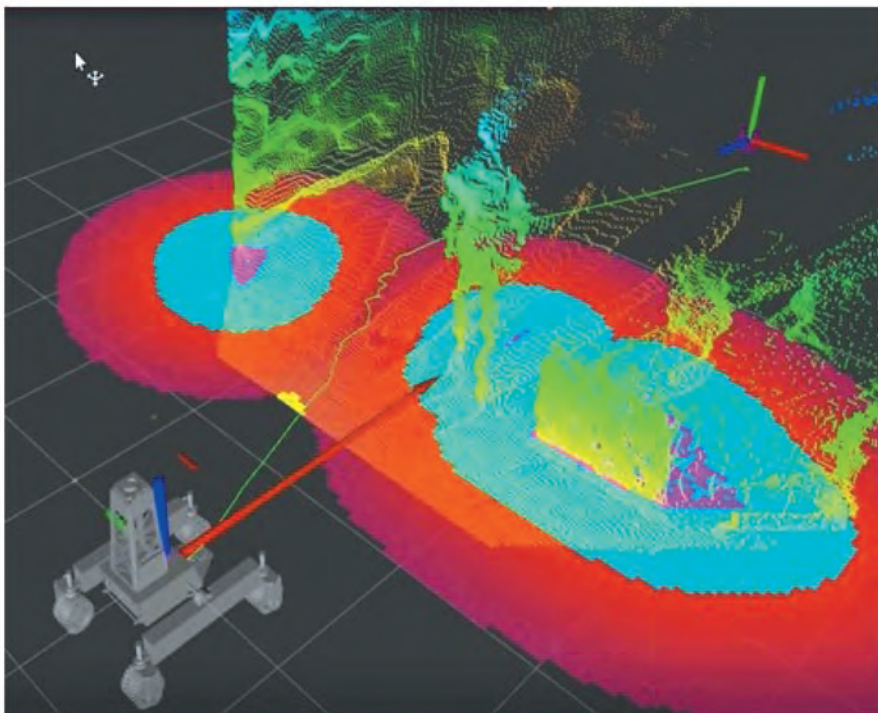


Fig. 5. Point cloud recorded by the rover during trials

3.3. Determining and tracking the pathway

Kalman uses cost-map via an A-star (A*) algorithm to plan non-collision pathways of movements at the time of the travel to assigned coordinates. Finally,

another autonomy module, the so-called “path follower”, changes the planned traverse and information about the position of the robot into the commands for his wheels. The concept is presented on Figure 6.

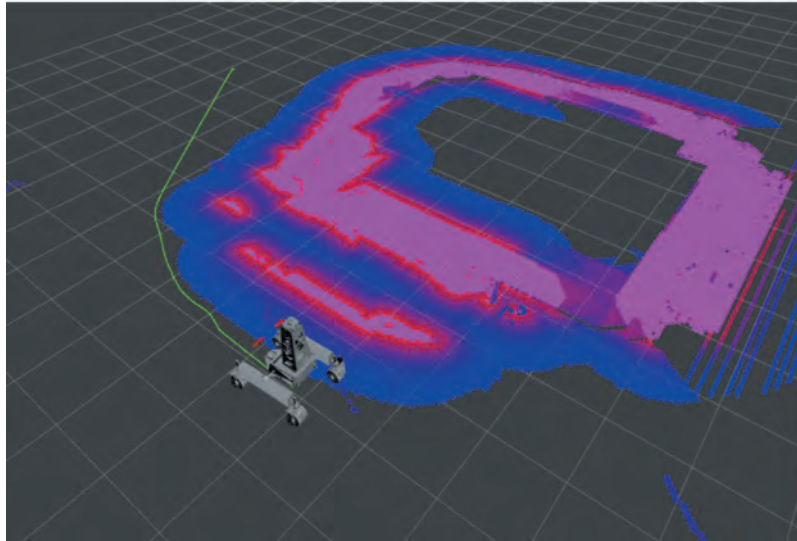


Fig. 6. Remembered obstacle locations in a coordinate system and designated path

3.4. Object detection

Kalman is able to detect all kinds of objects used during the competition as points of interests for the rover. Such functionality is implemented with AI (Artificial Intelligence) used in combination with conventional

methods of computer vision. For instance, the black arrows used in the competition in India are identified by simple edge detection and contrast adjustments of camera images, while cones, which are more difficult to detect, are traced by a neural network trained especially for this purpose. Its imaging is shown in Figure 7.

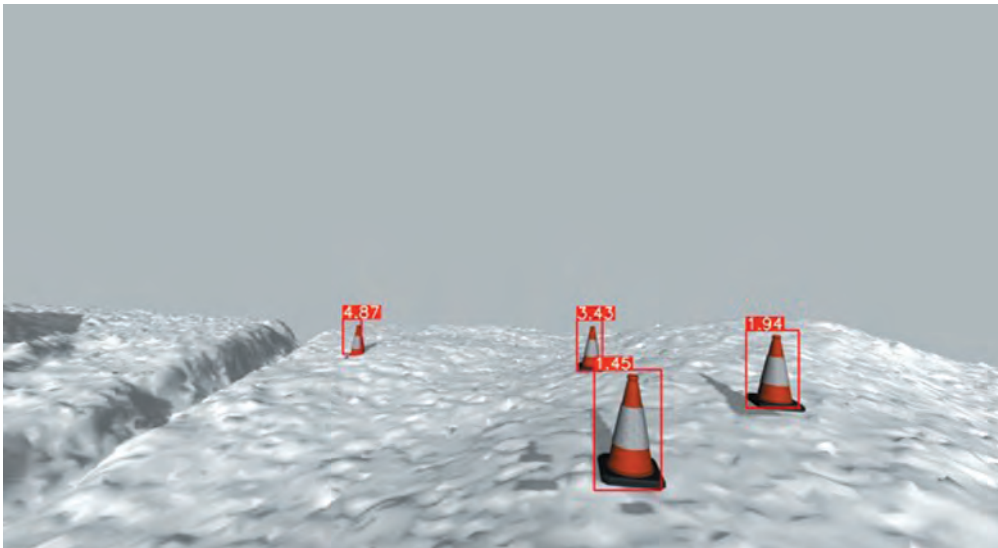


Fig. 7. Cones detected by the rover

3.5. Supervisor: Kalman's brain

Despite the fact that the Kalman rover can easily move on a planet surface and detect objects it finds

interesting, this alone is not enough to perform a successful autonomous exploratory mission. Kalman also has a so-called “supervisor” that serves as the brain of the robot during a mission. This supervisor controls

all of the activities which the robot is expected to perform during the traverse and plots next target points for the rover. Before the start of every contest, the rules of the autonomous competition are published and, based on this instruction, the supervisor is designed by us to maximize the capabilities of Kalman. In summary, Kalman's autonomous driving system combines sophisticated algorithms, including Kalman filter, visual odometry, pathway planning, object detection and supervision module. A complex structure like this enables autonomous navigation, terrain mapping, object detection, and performing complex tasks in difficult Martian environments. The combined functionality of those subsystems ensures the success of Kalman's autonomous exploration missions.

4. CONCLUSION

Kalman is a robot which can perform tasks autonomously and its mechanical design makes it capable of handling demanding terrain well. Such a planetary rover could participate in space voyages as a companion during space walks as it is able to carry cargo and tools, and is able to provide aid in emergency situations. It can also take part in exploration and mining missions, which can be helpful during the field reconnaissance that may be crucial while expanding territory for colony development. Kalman, via modules such as the gripper, mobile research laboratory, or core

drill, can provide assistance in the assessment of resources on a designated area. Kalman has the capability to detect places of interest and record their location in addition to its ability to make contact with the base. Part of the tasks that would accompany the colonization of an alien planet could be performed by Kalman.

References

- [1] Olszewski M., Bednorz S., Łagan M.: *Łazik Kalman – Elektronika, Software oraz Science*. 59. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2022 [unpublished].
- [2] *Classify space rocks by using Python and artificial intelligence*. <https://learn.microsoft.com/en-us/training/paths/classify-space-rocks-artificial-intelligence-nasa/> [30.07.2023].
- [3] Gliwiński Ł., Mika A., Gibiec M.: *Kalman – łazik planetarny, który ewoluuje dzięki mechanicznym innowacjom*. 60. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2023.
- [4] Bednorz S., Urbanik I.: *Autonomiczna nawigacja łazika Planetarnego Kalman*. II Studencka Konferencja Kosmiczna, Wrocław 2022 [unpublished].

RADOSŁAW REJMAN, Eng.
rrejman@student.agh.edu.pl

KAROLINA GREŃ, Eng.
kgren@student.agh.edu.pl

RAFAŁ ŻELAZKO
rayferric@student.agh.edu.pl

WOJCIECH LIWACZ
wliwacz@student.agh.edu.pl

AGH University of Krakow
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

RADOŚLAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ

Autonomiczny łazik planetarny Kalman

W artykule zaprezentowano projekt, który stanowi dowód na przydatność organizacji studenckich oraz skuteczność popularyzacji zaawansowanych technologii i rozwiązań w przemysłowej przyszłości. Opracowany przez studentów autonomiczny łazik planetarny, wykorzystując filtr Kalmana oraz pozostałe algorytmy odpowiedzialne między innymi za dynamiczne mapowanie terenu oraz wyznaczanie ścieżek, jest w stanie bezkolizyjnie poruszać się nawet w najbardziej wymagających środowiskach. Łazik wykorzystuje również skonstruowane przez studentów ramię 6DOF do swobodnego podejmowania zadań manualnych, takich jak pobieranie próbek gleby czy zadania naprawcze. Jest on także wyposażony w wiertło, które umożliwi pobranie próbki gleby z głębokości co najmniej 30 cm, co mocno wesprze badania historii geologicznej regionu. Robot został wielokrotnie przetestowany z sukcesem na zawodach łazików planetarnych, co potwierdza potencjał takich platform w eksploracji kosmicznej i możliwości zastosowania w przemyśle, szczególnie w trudno dostępnych obszarach górniczych. Prezentowany projekt stanowi inspirację dla przyszłych młodych inżynierów i naukowców, otwierając perspektywy na wykorzystanie podobnych technologii w efektywniejszym i bezpieczniejszym funkcjonowaniu przemysłu.

Słowa kluczowe: łazik, robot, autonomia, mechanizacja

1. INTELIGENTNE PROCESY

W kontekście robotyki inteligentny proces odnosi się do zdolności robota lub systemu robotycznego do podejmowania autonomicznych decyzji, przetwarzania informacji, uczenia się z doświadczenia i adaptowania się do zmieniających się warunków. Inteligentne procesy w robotyce obejmują szereg zaawansowanych funkcji, które pozwalają robotom wykonywać skomplikowane zadania, interakcję z otoczeniem i ludźmi oraz samodzielne doskonalenie swoich umiejętności. Oto kilka przykładów inteligentnych procesów w kontekście robotyki:

- Planowanie ruchu: roboty wykorzystują algorytmy planowania ruchu, aby zaplanować optymalne trasy i unikać kolizji, gdy przemieszczają się po otoczeniu.
- Widzenie komputerowe: systemy robotyczne wykorzystują techniki widzenia maszynowego, takie jak rozpoznawanie obrazów i analiza sceny, aby identyfikować obiekty, ludzi czy odczytywać znaki drogowe.
- Sterowanie adaptacyjne: roboty mogą dostosowywać swoje działania do zmieniających się warunków,

np. reagować na niespodziewane przeszkody lub nowe zadania.

- Uczenie maszynowe: roboty uczą się z doświadczenia, zbierając dane ze swojego otoczenia i wykorzystując je do doskonalenia swoich umiejętności oraz podejmowania bardziej inteligentnych decyzji.
- Interakcja człowiek–robot: roboty wykorzystują technologie rozpoznawania mowy i emocji, aby lepiej komunikować się i współpracować z ludźmi.
- Autonomiczność: roboty autonomiczne są zdolne do samodzielnego działania bez stałej kontroli człowieka, podejmując decyzje w czasie rzeczywistym na podstawie danych z sensorów.

Inteligentne procesy w robotyce mają na celu zwiększenie efektywności, bezpieczeństwa i użyteczności robotów, umożliwiając im bardziej skomplikowane zadania, których nie byłyby w stanie wykonać zwykle, programowane maszyny. Jednocześnie jednak wymagają one zaawansowanych technologii, algorytmów i odpowiedniego zapewnienia bezpieczeństwa, aby zapobiec ewentualnym nieprzewidzianym zachowaniom robotów.

1.1. Makrokamera i analiza wizyjna

Na pokładzie łazika znajduje się wiele różnych kamer, między innymi służących do jazdy autonomicznej, są też kamery analogowe oraz cyfrowe, które wykorzystywane są podczas poruszania się, kiedy łazik sterowany jest manualnie, czy też kamery, które pozwalają uzyskać obraz w powiększeniu [1]. Obserwacja obiektów skalnych w powiększeniu jest niekiedy kluczowym elementem podczas ich identyfikacji, charakterystyka skał ma bowiem znaczenie podczas szacowania możliwości wydobywczych w regionie. W tym celu na pokładzie łazika marsjańskiego wykorzystywana jest makrokamera Arducam IMX298 MIPI 16MP, która umożliwia obserwowanie skał w znacznym powiększeniu oraz zapisywanie wyników obserwacji w formie zdjęć. Makrokamera działa najlepiej w odległości 6–10 cm, dając znaczne powiększenie przy zachowaniu odpowiedniej jakości materiału.

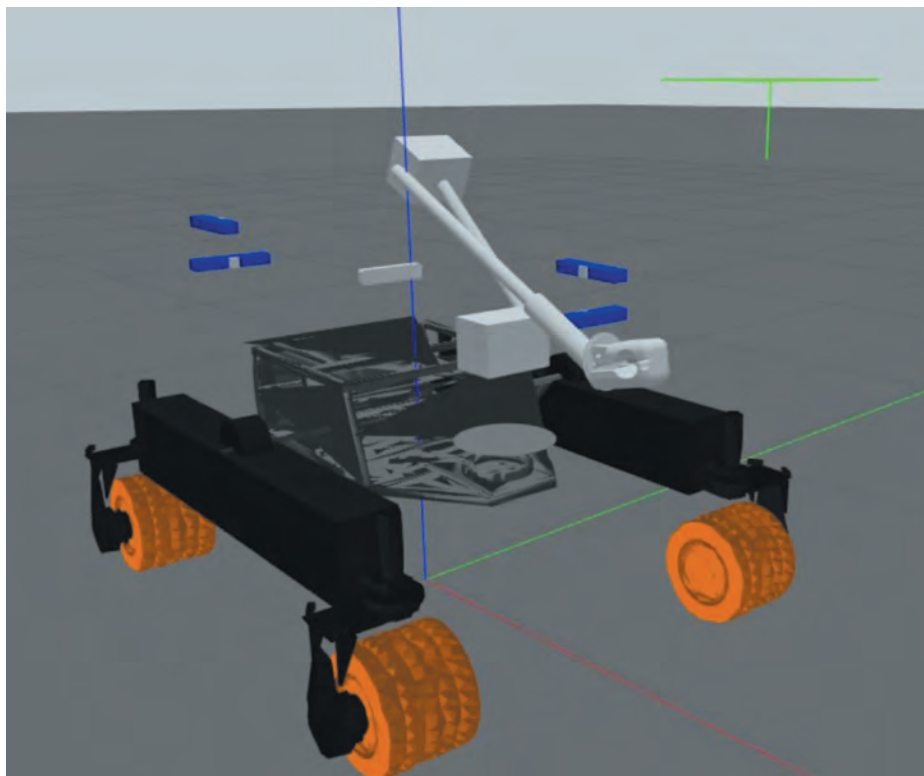
Platforma MS Learn oferuje darmowy kurs, który wykorzystuje dane z NASA do nauki tworzenia modelu sieci sztucznej inteligencji do rozpoznawania skał [2]. Kurs pozwala na zdobycie umiejętności analizy danych geologicznych, przetwarzania obrazów i technik uczenia maszynowego, co może znaleźć zastosowanie we wspieraniu działań prowadzonych na ziemi i w kosmosie. To otwiera nowe możliwości dla projektu łazika Kalmana, ponieważ taka sieć pozwoli-

łaby na wychwytywanie w czasie rzeczywistym obiektów większego zainteresowania. Dzięki temu łazik mógłby informować, że w danym terenie znalazł coś ciekawego oraz sam zapisywać znaczniki czasowe w nagrywanym materiale wideo do późniejszej analizy fragmentów przez człowieka. Byłoby to przydatne zwłaszcza w trakcie różnych zawodów, kiedy trzeba w krótkim czasie dokonać analizy zebranego materiału badawczego. Dlatego w zespole Science, niezależnie od zespołu Software, rozpoczęto tenże kurs dla pozyskania nowych umiejętności i zaimplementowania własnej sieci neuronowej.

1.2. Trajektorie i kinematyka odwrotna

Automatyzacja pobierania próbek jest kluczowym elementem w dziedzinach takich jak badania geologiczne czy eksploracja kosmiczna. Jednym z zaawansowanych podejść w tym zakresie jest wykorzystanie zaprogramowanych trajektorii. Polega to na wcześniejszym zdefiniowaniu ścieżki ruchu dla urządzenia biorącego próbki, np. dla manipulatora łazika planetarnego. Dzięki zaprogramowanym trajektoriom możliwe jest precyzyjne sterowanie ruchem i dokładne określenie położenia punktów pobierania próbek, co minimalizuje ryzyko ich uszkodzenia lub utraty.

Kinematyka odwrotna jest nieodzownym elementem w implementacji zaprogramowanych trajektorii.



Rys. 1. Model łazika w aplikacji stacji naziemnej, obrazujący stan poszczególnych elementów w przestrzeni

Stanowi ona matematyczny mechanizm, który umożliwia wyznaczenie odpowiednich położeń i orientacji dla różnych elementów manipulatora w celu osiągnięcia określonej pozycji docelowej. W przypadku pobierania próbek kinematyka odwrotna umożliwia wyznaczenie odpowiednich ustawień dla chwytaka czy narzędzia, aby trafnie umieścić go w miejscu, w którym ma nastąpić pobranie próbek.

Dzięki zastosowaniu zaprogramowanych trajektorii i kinematyki odwrotnej automatyzacja pobierania próbek staje się bardziej skuteczna, precyzyjna i efektywna. To nie tylko przyspiesza proces pobierania próbek, ale także pozwala na bezpieczne i dokładne zdobywanie informacji, które są niezbędne do prowadzenia badań naukowych oraz eksploracji kosmicznej w sposób bardziej efektywny i zaawansowany technologicznie.

Na rysunku 1 przedstawiono zrzut ekranu z aplikacji do sterowania robotem, na którym widać uproszczony model łazika podczas operacji z trajektoriami ramienia.

1.3. Inteligencja rozproszona

Inteligencja rozproszona jest często stosowana w kontekście systemów złożonych, takich jak społeczności organizmów, grupy ludzi, a także w dziedzinie technologii, np. w robotyce czy sztucznej inteligencji. W takich systemach inteligencja wynika z interakcji i współdziałania wielu elementów, które razem tworzą zorganizowany i inteligentny układ.

W dziedzinie technologii inteligencja rozproszona może odnosić się do współpracy wielu robotów w celu wykonania skomplikowanych zadań. Każdy robot może mieć ograniczone zdolności, ale jako grupa są w stanie skutecznie wykonać zadanie, które indywidualnie byłoby nieosiągalne.

Łazik planetarny Kalman to robot o zaawansowanej konstrukcji, dzięki której jest w stanie poruszać się w trudnym terenie. Łazik potrafi poruszać się pomiędzy różnymi punktami, to jest obiektami geologicznymi (np. skałami) czy też przeszkodami takimi jak tyczki czy pachołki. Podczas trawersu gromadzone są dane w postaci współrzędnych GPS. W momencie, w którym Kalman byłby wykorzystywany faktycznie jako łazik planetarny, istniałaby wówczas możliwość gromadzenia danych uzyskanych z pokładu łazika wraz z danymi pochodzącymi z orbiterów. Połączenie danych z orbiterów oraz pokładu Kalmana wraz z algorytmami sztucznej inteligencji dałoby możliwość lepszego przetwarzania uzyskanych informacji, co wpłynęłoby na uzyskanie bardziej szczegółowych danych interpretacji geologicznej danego regionu, zwłaszcza gdy chodzi o dokładne mapowanie powierzchni terenu.

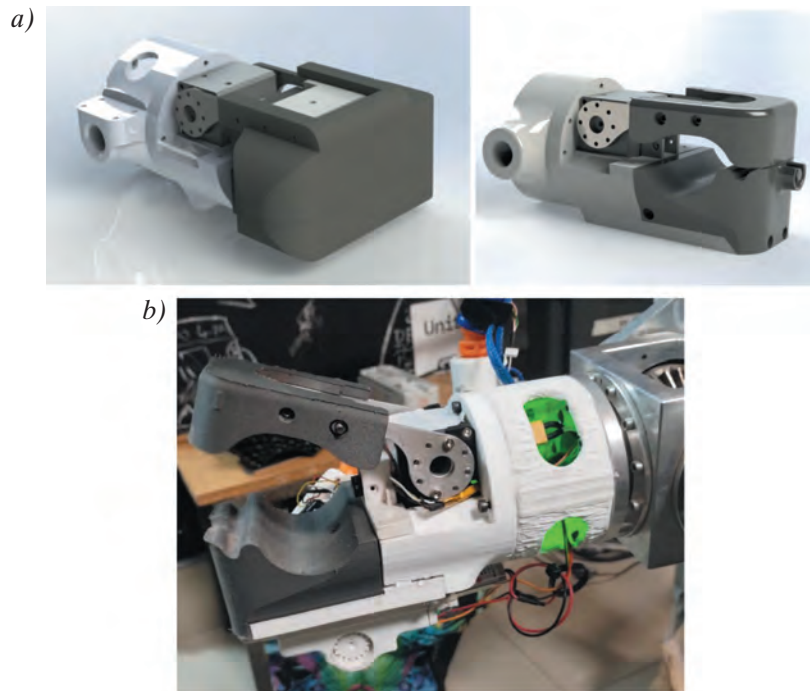
W konstrukcji Kalmana wykorzystano narzędzia takie jak GPS, enkodery oraz kamery głębi. Podczas faktycznych misji warto byłoby rozszerzyć zestaw narzędzi, dodając elementy, które pozwolą na detekcję pozycji słońca czy triangulację dla lepszego pozycjonowania. Detekcja pozycji słońca może być używana jako funkcja bezpieczeństwa dla łazika. Na przykład, jeśli wystąpią problemy z komunikacją, łazik może wykorzystać pozycję słońca do określenia swojej lokalizacji i przekazania tych danych do bazy naziemnej. To może pomóc w znalezieniu łazika w przypadku awarii lub utraty połączenia. Gdy jednostka posiada panele fotowoltaiczne do ładowania, detekcja pozycji słońca umożliwia wtedy optymalne ich rozłożenie w celu wydajniejszego poboru energii jego promieniowania i przedłużenia zdolności operacyjnych. Natomiast w przypadku, gdy łazik znajduje się w dużej odległości od stacji naziemnej lub innych punktów komunikacyjnych, triangulacja sygnału może pomóc w precyzyjnym określeniu kierunku, z którego przychodzą sygnały komunikacyjne. Dzięki temu możliwe jest lepsze utrzymanie połączenia i poprawa jakości komunikacji.

2. MOŻLIWOŚCI WYDOBYWCZE

2.1. Chwytnak

W projekcie łazika planetarnego Kalman kluczowym założeniem jest zastosowanie modułowości. W celu realizacji różnorodnych zadań łazik wyposażony jest w kilka rodzajów szczęk, które są montowane na manipulatorze, a ich wybór jest dostosowany do konkretnych zadań, jakie łazik ma wykonać. Do precyzyjnych operacji wykorzystywany jest chwytak o specjalnej konstrukcji, wyposażony w profilowane wypustki, które okazują się przydatne podczas przenoszenia przedmiotów lub wykonywania prostych prac serwisowych, takich jak odkręcanie czy zamykanie zaworów. Modele wykorzystywanych nakładek wraz z gotowym modułem chwytaka znajdują się na rysunku 2 [3].

Zestaw szczęk wykorzystywany w celach wydobywczych również został zaprojektowany w sposób unikalny. Konstrukcja tych szczęk umożliwia pobieranie próbek gleby, a następnie dzięki szczelnemu połączeniu szczęki górnej i dolnej możliwe jest przeniesienie pobranej próbki do mobilnego laboratorium badawczego lub specjalnego pojemnika przeznaczonego do przechowywania takich próbek. Ta elastyczność i funkcjonalność modułowego podejścia do szczęk znacznie zwiększa wszechstronność łazika Kalmana, umożliwiając mu skuteczne wykonywanie różnorodnych misji na powierzchni planety.



Rys. 2. Modele (a) oraz złożony chwytak (b)

2.2. Ramię

Łazik planetarny Kalman od momentu wprowadzenia nowego rozwiązania, jakim jest mechaniczne ramię 6DOF, zyskał możliwość pracy w dwóch trybach: autonomicznym oraz z kontrolą operatora. Dzięki sześciu stopniom swobody nowe ramię oferuje znacznie większą precyzję w wykonywaniu zadań. Wyposażone w kamery umożliwia łazikowi efektywną obserwację obiektów w najbliższym otoczeniu. Szczególną

zaletą tego ramienia 6DOF jest jego duża skala działania i zasięg, co pozwala na obserwację oraz pobieranie próbek z mniej dostępnych uprzednio dla Kalmana miejsc. Ramię robota staje się nieocenionym narzędziem wspierającym operacje naprawcze, podnosząc tym samym wartość funkcjonalną i efektywność działania łazika Kalmana [3].

Na rysunku 3 znajduje się model obecnie stosowanego ramienia.



Rys. 3. Obecnie stosowane ramię 6DOF

2.3. Wiertło

Układ napędowy użyty w tym projekcie został zaczerpnięty z rozwiązań dostępnych na rynku. Tak dostosowana konstrukcja obejmuje kilka kluczowych elementów. Na początku znajduje się silnik szczotkowy DC o napięciu 18 V, który stanowi rdzeń napędu. Następnie zastosowano przekładnię planetarną, która jest skompletowana ze sprzęgłem bezpieczeństwa (kulkowym), a połączenie tych dwóch elementów zapewnia niezawodne działanie układu. Aby osiągnąć ruch pionowy, użyto mechanicznego mechanizmu koła zębatego-listwy zębatej. Ten mechanizm jest napędzany przez silnik DC, który został zestawiony z przekładnią planetarną, co gwarantuje płynność i skuteczność działania. Dodatkowo zastosowano specjalne prowadnice, które stabilizują ruch mechanizmu, co pozwala na jego harmonijne i kontrolowane opuszczanie się.

Cały układ napędowy został starannie dostosowany i zoptymalizowany, aby zapewnić nie tylko wysoką wydajność, ale także bezpieczeństwo i stabilność pracy. Dzięki wykorzystaniu podzespołów z uprzednio

stosowanych urządzeń oraz precyzyjnym rozwiązaniom mechanicznym ten zespół napędowy jest nie tylko skutecznym narzędziem, ale również doskonałym przykładem adaptacji istniejących technologii do nowych zastosowań.

Obecny model świdra powstał w celu spełnienia wymagań nowych zasad European Rover Challenge, według których łazik ma mieć możliwość pobrania próbki spod powierzchni o głębokości większej niż 30 cm. Analog regolitu marsjańskiego, jakiego należy się spodziewać podczas zawodów, sprawia, że kolejne prototypy muszą być sprawdzane pod kątem nie tylko możliwości wwiercania się, ale i odporności zastosowanych materiałów i elementów, aby na zakończenie operacji szczelnie przechować pobrany rdzeń. Mechanizm wiertła oraz świder rdzeniowy pokazano na rysunku 4.

Druk 3D pozwala na szybkie prototypowanie kolejnych iteracji świdra i zastosowanie nowych form usprawniających funkcjonowanie. W momencie, gdy konkretny model spełni oczekiwania pod względem ogólnego działania, następuje wykonanie elementów z bardziej odpornych materiałów, takich jak stal.



Rys. 4. Modele obecnych wersji mechanizmu wiertła oraz rdzeniówki

3. AUTONOMIA

3.1. Lokalizowanie robota

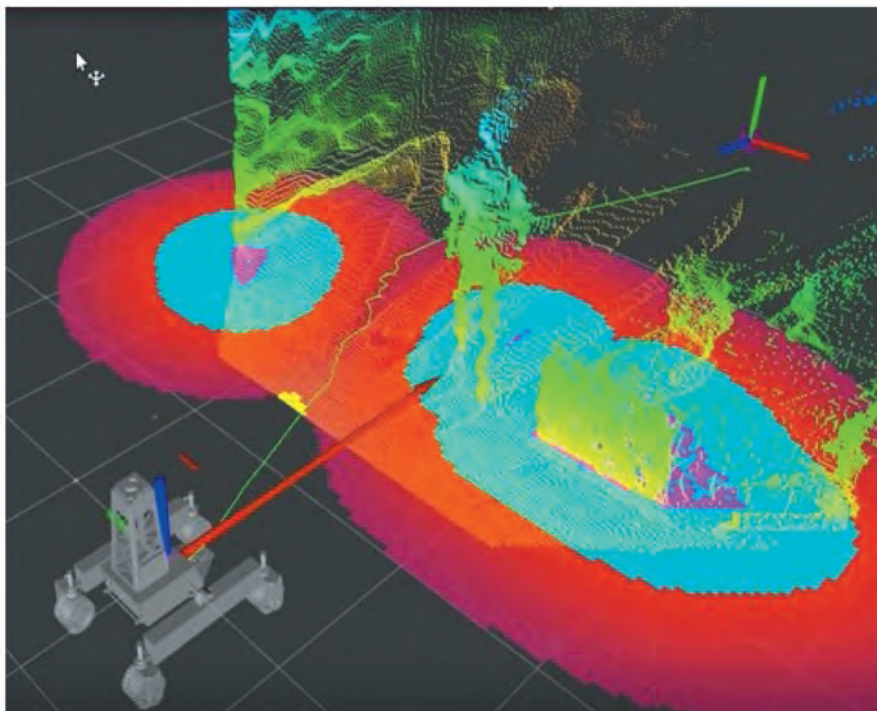
Łazik Kalman nazwany został na cześć Rudolfa Kalmana, czyli twórcy tzw. filtru Kalmana, algorytmu, który już od lat sześćdziesiątych na szeroką skalę używany jest w robotyce. Pozwala on odszumiać odczyty z czujników robota i przewidywać jego stan w dowolnej chwili w czasie. Łazik Kalman wykorzystuje ten algorytm do zwielokrotnienia wydajności odometrii, czyli podsystemu mierzącego zmiany w położeniu robota i określającego jego pozycję w przestrzeni. Odometria Kalmana opiera się na modułach GPS oraz IMU zawierających żyroskop i akcelerometr. Odczyty z tych przyrządów są porównywane z wynikami odometrii wizualnej, która mierzy ruch robota na podstawie zdjęć z kamer rozmieszczonych dookoła jego kadłuba. Wszystkie zebrane dane są ze sobą łączone, co przy użyciu filtru Kalmana daje bardzo precyzyjne informacje o położeniu łazika z dokładnością rzędu milimetrów.

3.2. Mapowanie terenu

Marsjańskie krajobrazy pełne są gładów, stromych klifów i kraterów. Tęgo typu trudne warunki stanowią wyzwanie dla łazików planetarnych pokroju Kalmana.

Łaziki nie byłyby w stanie poruszać się autonomicznie bez jakichkolwiek kamer lub czujników otoczenia. Dlatego Kalman wyposażony jest w zestaw elektronicznych „oczu” w postaci czterech kamer głębi Intel RealSense, które jednocześnie działają jak standardowa kamera oraz podobnie jak skaner LIDAR w jednym urządzeniu. Kamery RealSense wykorzystują widzenie stereoskopowe, a to oznacza, że posiadają dwa czujniki podczerwieni umieszczone na ich obu końcach. Dzięki nim kamera jest w stanie wydobyć informacje o głębi widzianego obrazu w podobny sposób, jak robiłaby to para ludzkich oczu [4].

Informacje o głębi pochodzące z kamer są przedstawiane w postaci chmury punktów, gdzie każdy piksel w klatce obrazu odpowiada co najwyżej jednemu wierzchołkowi w chmurze. Niestety ten format danych zawiera dużo zbędnych informacji i nie pozwala nam w łatwy sposób określić, w których kierunkach Kalman jest w stanie pojechać. Dlatego autonomiczne algorytmy Kalmana przetwarzają strumień danych z kamer tak, aby wyciągnąć z dokładnej chmury punktów tylko to, co interesuje łazik, czyli to, czy w danym miejscu znajduje się przeszkoda, czy też nie. Kalman wraz z przebiegiem podróży wielokrotnie dokonuje tej analizy chmury punktów i zapamiętuje niedostępne miejsca w tzw. cost-mapie, czyli dwuwymiarowej macierzy przechowującej strukturę otoczenia widocznego z lotu ptaka dookoła łazika. Zobrazowanie chmury punktów znajduje się na rysunku 5.

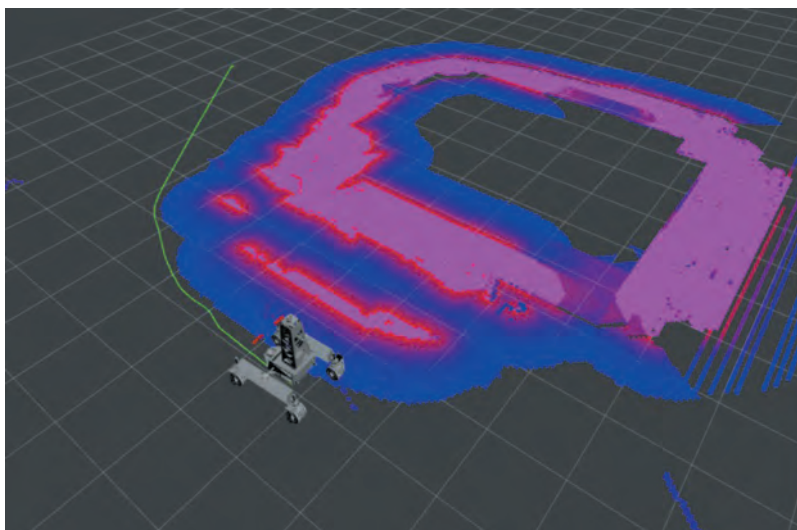


Rys. 5. Chmura punktów zarejestrowana przez łazik podczas testów

3.3. Wyznaczanie i śledzenie ścieżki

Kalman wykorzystuje cost-mapę, by za pomocą algorytmu A-star (A*) planować bezkolizyjne ścieżki ruchu w trakcie podróży do miejsca o zadanych

współrzędnych. Na sam koniec inny moduł autonomii, tzw. *path follower*, zamienia zaplanowaną ścieżkę oraz informacje o położeniu robota na polecenia dla jego kół. Idea została przedstawiona na rysunku 6.

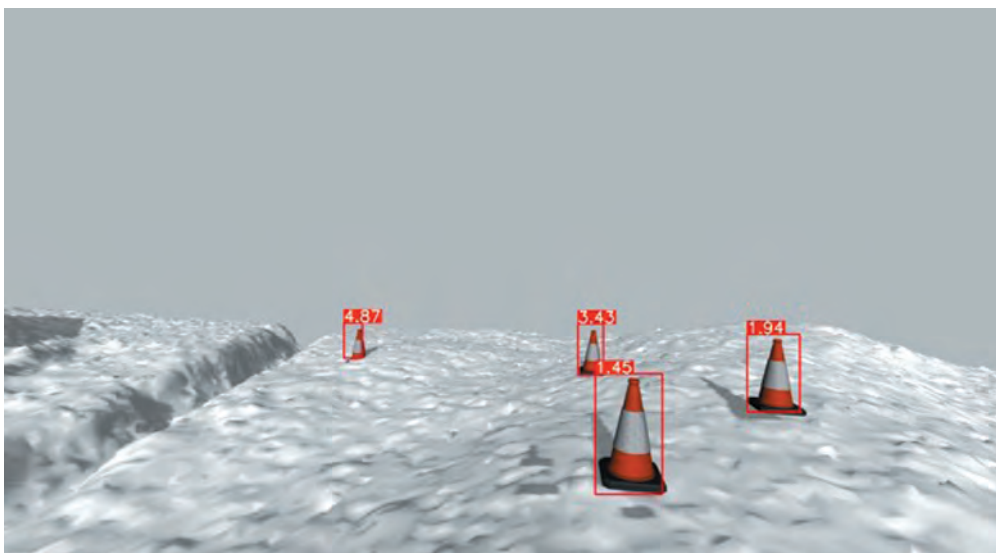


Rys. 6. Zapamiętane położenie przeszkód w układzie współrzędnych i wyznaczona ścieżka

3.4. Wykrywanie obiektów

Kalman potrafi również wykrywać wszelkiej maści obiekty używane podczas zawodów jako punkty zainteresowania dla łazika. Taka funkcjonalność jest zaimplementowana przy zastosowaniu sztucznej inteligencji w połączeniu z tradycyjnymi metodami *computer*

vision. Przykładowo czarne strzałki używane na zawodach w Indiach są identyfikowane dzięki zwykłemu wykrywaniu krawędzi i dostosowywaniu kontrastu zdjęć z kamer, a trudniejsze do wykrycia pachołki drogowe są odnajdywane przez specjalnie wytrenowaną w tym celu sieć neuronową. Jej zobrazowanie znajduje się na rysunku 7.



Rys. 7. Pachołki wykryte przez łazik

3.5. Supervisor: mózg Kalmana

Mimo że łazik Kalman potrafi bez problemu przemieszczać się po powierzchni planety oraz wykrywać

interesujące go obiekty, samo to nie wystarczy, aby przeprowadzić udaną autonomiczną misję badawczą. Kalman posiada również tzw. supervisor, który spełnia rolę „mózgu” robota podczas wykonywania misji.

Supervisor kontroluje wszystkie czynności, które ma wykonać robot w trakcie przejazdu, i wytycza kolejne punkty docelowe dla łazika. Przed rozpoczęciem każdego zadania publikowane są zasady konkurencyjnej i na podstawie tej instrukcji supervisor jest przez nas projektowany tak, aby w jak najlepszy sposób wykorzystać możliwości Kalmana

System autonomicznej jazdy Kalman łączy ze sobą zaawansowane algorytmy, w tym filtr Kalmana, odometrię wizualną, planowanie ścieżki, wykrywanie obiektów i moduł nadzorczy. Ta kompleksowa struktura umożliwi Kalmanowi autonomiczną nawigację, mapowanie terenu, wykrywanie obiektów i wykonywanie złożonych zadań w trudnych marsjańskich środowiskach. Połączona funkcjonalność tych podsystemów zapewnia sukces autonomicznych misji badawczych Kalmana.

4. PODSUMOWANIE

Kalman jest robotem, który potrafi działać autonomicznie, a jego mechaniczna konstrukcja sprawia, że jest w stanie dobrze poradzić sobie w wymagającym terenie.

Łazik planetarny, taki jak Kalman, mógłby brać udział w kosmicznych wozach jako towarzysz kosmicznych spacerów, ponieważ potrafi nosić ładunki, przenosić narzędzia, jest w stanie udzielić pomocy w nagłych wypadkach. Może uczestniczyć również w pracach poszukiwawczych i wydobywczych, co może być pomocne podczas zwiadu terenowego, który może być klu-

czowy podczas rozszerzania terytorium w przypadku rozbudowy kolonii. Kalman dzięki modułom takim jak chwytak, mobilne laboratorium badawcze czy też świder rdzeniowy jest w stanie pomóc w ocenie zasobów na danym terenie. Kalman potrafi wykrywać interesujące miejsca oraz zapisywać ich lokalizację czy komunikować się z bazą. Część z zadań, które towarzyszyłyby kolonizacji obcej planety mogłyby być wykonywane przez Kalmana.

Literatura

- [1] Olszewski M., Bednorz S., Łagan M.: *Łazik Kalman – Elektronika, Software oraz Science*. 59. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2022 [niepublikowane].
- [2] *Classify space rocks by using Python and artificial intelligence*, <https://learn.microsoft.com/en-us/training/paths/classify-space-rocks-artificial-intelligence-nasa/> [30.07.2023].
- [3] Gliwiński Ł., Mika A., Gibiec M.: *Kalman – łazik planetarny, który ewoluje dzięki mechanicznym innowacjom*. 60. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2023.
- [4] Bednorz S., Urbanik I.: *Autonomiczna nawigacja łazika planetarnego Kalman*. II Studencka Konferencja Kosmiczna, Wrocław 2022 [niepublikowane].

inż. RADOŚLAW REJMAN

rrejman@student.agh.edu.pl

inż. KAROLINA GREŃ

kgren@student.agh.edu.pl

RAFAŁ ŻELAZKO

rayferric@student.agh.edu.pl

WOJCIECH LIWACZ

wliwacz@student.agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków