



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Graduate Program in Instrumentation, Control and Automation
of Mining Processes - PROFICAM
Federal University of Ouro Preto - School of Mines
Associação Instituto Tecnológico Vale**

Master's Thesis

**Evaluation of the Effects of User Profile and Interface
Characteristics on Performance During Robotic Teleoperation**

Aline Xavier Fidêncio

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brazil
2018**

Aline Xavier Fidêncio

**Evaluation of the Effects of User Profile and Interface
Characteristics on Performance During Robotic Teleoperation**

Thesis presented to the graduate program
in Instrumentation, Control and Automation
of Mining Processes of the Federal
University of Ouro Preto and the Instituto
Tecnológico Vale as partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master in
Automation and Control Engineering.

Supervisor: Prof. Dr. Paulo Marcos de
Barros Monteiro

Co-supervisor: Prof. Dr. Gustavo Medeiros
Freitas

Ouro Preto

2018

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Evaluation of the Effects of User Profile and Interface Characteristics on
Performance During Robotic Teleoperation

Aline Xavier Fidêncio

Dissertação defendida e aprovada em 14 de setembro de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



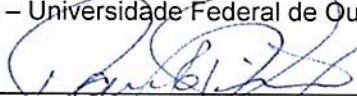
D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro
Orientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Gustavo Medeiros Freitas
Coorientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. Agnaldo José da Rocha Reis
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Paulo Raimundo Pinto
Membro externo – Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG)

F451e Fidêncio, Aline Xavier .
 Evaluation of the Effects of User Profile and Interface Characteristics on
 Performance During Robotic Teleoperation [manuscrito] / Aline Xavier
 Fidêncio. - 2018.
 111f.: il.: color; tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.
 Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
 Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas
 Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e
 Automação de Processos de Mineração.
 Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos
 Minerais.

 1. Teleoperation. 2. Mining. 3. Haptic Devices. 4. Evaluation Methodology.
 I. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. II. Freitas, Gustavo Medeiros . III.
 Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

To my parents.

Acknowledgments

First of all, I would like to thank my parents, Maria and Odemir, for their unconditional love, for dedicating their lives to our family, for all the support and for always believing on my success. I am where I am thanks to you and for you. I thank my sisters Érika and Karina and my new brother Gilson for their friendship and love, as well as for the ideas and contributions given to this work. Grandma, aunt and godmother: thank you for always sending good energies! Last but not least, I would like to thank my lovely Max for being there for me and for believing in me when I would no longer do.

The research work presented in this master thesis was developed inside the Robotics Lab of the *Instituto Tecnológico Vale*, where I got much support from my colleagues. This project was partially financed by CAPES and VALE S.A whom I would also like to thank.

I also wish to express my sincere gratitude to my advisors Prof. Paulo Monteiro and Prof. Gustavo for their guidance.

Finally, to all those friends who in different ways helped me going through this, I leave my sincere gratitude.

ABSTRACT

In the mining industry, operator safety has always been a crucial point, and therefore demands attention. In addition, given the high investments made in the enterprise, the search for a consistent and efficient production process is also relevant. To increase productivity and safety, teleoperation techniques can be used to allow the operator to be removed from the risk areas and operate the equipment from a safe distance.

The work presented in this master's thesis was developed at the *Instituto Tecnológico Vale* (ITV) as a part of a broader project that aims the development of a conceptual framework that enables the analysis and validation of the application of teleoperation techniques in mining equipment. These equipment could be either used for exploration, engineering or extraction. More specifically, this framework will permit the analysis of relevant information for teleoperation. This work represents the initial step taken, which comprises the execution of proof-of-concept tests in laboratory using a robotic system.

Different teleoperation interfaces schemes consisting of video and haptic devices are analyzed under different aspects and the user point of view is taken into account. The goal is to analyze the effects of the force feedback and of different visual feedback during teleoperation and to evaluate which predefined users characteristics can contribute to better performance during teleoperation.

Experimental tests were performed using a commercial mobile robotic platform Seekur Jr and teleoperation interfaces consisting of the haptic devices Novint Falcon and Geomagic Touch. This platform can be programmed in such a way that it operates emulating a mining equipment. For practical application-oriented tests, different operations from a mining process can be used as application of study (e.g. explosive charging or excavators operations). For the purposes of this work, interfaces for the control of the robotic platform locomotion were analyzed.

In order to evaluate the influence of interface characteristics and users profile on performance during teleoperation two experiments were conducted. The experiments consisted of guiding the robotic platform in a scenario containing obstacles, using the different interfaces. In this work, delays in communication during teleoperation were not addressed. Results show that the use of force feedback effectively contributes for better performances in term of task execution time, number of collisions with obstacles and task completion in teleoperation activities. Moreover, additional visual information, such as the environment map, can also increase perception of obstacles.

Keywords: teleoperation, mining, haptic devices, evaluation methodology

RESUMO

Na indústria da mineração, a segurança do operador sempre foi um ponto crucial, demandando, portanto, cuidadosa atenção. Além disso, dados os altos investimentos realizados no empreendimento, a busca por um processo de produção consistente e eficiente é também relevante. Com o objetivo de aumentar a produtividade e a segurança nas operações dentro da mineração, técnicas de teleoperação podem ser utilizadas para permitir que o operador seja removido das áreas de risco e opere o equipamento à distância.

Em essência, a teleoperação significa que é possível haver uma separação física entre a unidade de comando (sistema local) e a unidade de execução (sistema remoto), ainda mantendo a relação entre os dois. Isto é, apesar da separação física, o sistema local é ainda capaz de comandar o sistema remoto. Idealmente, para que tal comando seja feito de maneira mais eficaz possível, deseja-se prover ao operador uma experiência com o ambiente remoto de forma natural e realista, de tal forma que ele tenha a sensação de estar interagindo diretamente com o ambiente remoto, porém sem as perturbações típicas desses ambientes (ruído, vibrações, calor, etc.) e com a possibilidade de ampliação dessa percepção.

Com a utilização da teleoperação, é possível, além de reduzir os riscos a que o operador está exposto em suas atividades, melhorar seu desempenho na operação destes equipamentos durante a realização das tarefas.

O trabalho apresentado nesta dissertação de mestrado foi desenvolvido no Instituto Tecnológico Vale (ITV) como parte de um projeto mais amplo que visa o desenvolvimento de um arcabouço que permita a análise e validação da aplicação de técnicas de teleoperação a equipamentos de mineração. Estes equipamentos podem ser usados tanto para tarefas de exploração, quanto de engenharia ou extração. Mais especificamente, este arcabouço permitirá a análise de qual informação é relevante e auxilia o operador durante a operação do equipamento.

No âmbito deste projeto, o trabalho descrito nesta dissertação de mestrado representa o primeiro passo dado, que compreende a execução de testes de conceito em laboratório usando um sistema robótico.

Diferentes interfaces de teleoperação compostas por dispositivos hápticos e de vídeo são analisadas diante de diferentes aspectos e o ponto de vista do usuário é levado em consideração. O objetivo é analisar os efeitos da realimentação de força e da realimentação visual durante a realização de tarefas de maneira teleoperada e avaliar quais características predefinidas dos operadores podem contribuir para um melhor desempenho durante a

teleoperação de um equipamento.

Para realizar os testes, a plataforma robótica móvel comercial Seekur Jr e interfaces de teleoperação compostas por dispositivos hápticos Novint Falcon e Geomagic Touch são utilizados. Esta plataforma robótica pode ser programada de tal forma a operar emulando um equipamento de mineração. Para a realização de testes voltados a aplicações práticas, diferentes operações de um processo de mineração podem ser utilizadas como aplicação de estudo (carregamento de explosivos, operação de uma escavadeira, por exemplo). Para os fins de estudo deste trabalho, foram analisadas as interfaces para o controle da locomoção da plataforma robótica.

Para avaliar a influência das características da interface e do perfil dos usuários no desempenho durante a teleoperação dois experimentos foram conduzidos. Os experimentos consistiram em comandar a plataforma robótica em um cenário contendo obstáculos utilizando as diferentes interfaces desenvolvidas. Neste trabalho, a presença de atrasos na comunicação durante a teleoperação não foi considerada. Os resultados mostram que o uso da realimentação de força efetivamente contribui para melhor desempenho durante a execução de tarefas de forma teleoperada, em termos do tempo de execução da tarefa, do número de obstáculos colididos e do nível de conclusão da tarefa. Além disso, informações visuais adicionais tais como um mapa do ambiente aumentam a percepção de obstáculos.

Palavras-chave: teleoperação, mineração, interfaces hápticas, metodologias de avaliação

List of Figures

Figure 1 – Teleoperated system overview.	23
Figure 2 – The two possible steering schemes for mobile robots (COOK, 2011). . .	28
Figure 3 – Filesystem level structure of ROS.	29
Figure 4 – The computation graph level of ROS.	30
Figure 5 – Scheme of how nodes publish and/or subscribe to topics in ROS in a many-to-many relation-like.	31
Figure 6 – Connection setup between two nodes by a ROS master.	31
Figure 7 – Generated URDF model of the mobile robotic platform Seekur Jr. . . .	32
Figure 8 – RViz screen showing the Seekur Jr UDRF model and standard message data like laser scan and tf.	34
Figure 9 – Robotic platform Seekur Jr.	36
Figure 10 – Architecture scheme of the Seekur Jr.	37
Figure 11 – Visualization of the Seekur Jr in MobileEyes software.	38
Figure 12 – One of the images obtained from the stereo vision camera.	39
Figure 13 – Depth image obtained from the stereo camera.	40
Figure 14 – URDF Model of the mobile robotic platform Seekur Jr.	40
Figure 15 – The haptic devices Novint Falcon and Phantom Omni, used in the development of the different teleoperation interfaces.	43
Figure 16 – Overview of the teleoperation system using the Novint Falcon haptic device.	44
Figure 17 – Images from the Axis camera located in front of the robot that were provided to operators.	44
Figure 18 – Car-driving metaphor: mapping a logical point (x,y) to motion param- eters. Adapted from (LEE et al., 2005).	45
Figure 19 – Commands for the two control configurations of the Falcon device. . . .	46
Figure 20 – 2-D circle-rectangle collision detection: relevant areas	47
Figure 21 – Obstacles projection calculation during the collision computation. r_{max} is maximum distance within which detected objects are considered ob- stacles. The projections are calculated based on obstacle possible w.r.t the heading direction of the robot.	48
Figure 22 – Overview of the teleoperation system using the Geomagic Touch haptic device.	50
Figure 23 – Monocular image obtained from one of the cameras.	51
Figure 24 – Stereo images provided to the operator while using one of the telep- eration interfaces.	52
Figure 25 – Command configuration for the Phantom haptic device used to control the mobile platform.	52

Figure 26 – Relevant areas considered according to the desired robot movement. Adapted from (LEE et al., 2005).	53
Figure 27 – Map of the environment that was displayed to the operator. Colors different from red indicate that a force feedback was being applied at the Phantom.	54
Figure 28 – Schematic diagram of the tasks performed in Test 1.	58
Figure 29 – Test environment in which Test 1 was performed.	60
Figure 30 – Schematic diagram of the task performed in Test 2.	61
Figure 31 – Test environment in which Test 2 was performed.	61
Figure 32 – Future application: Seekur Jr operating as an excavator.	73

List of Tables

Table 1 – Teleoperation interfaces developed using the Novint Falcon haptic device.	43
Table 2 – Evaluated teleoperation interfaces	50
Table 3 – Average task execution time (mm:ss) and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects ($n = 16$).	63
Table 4 – Percentage of task completion (%).	64
Table 5 – Average number of obstacles and standard deviation (SD) for all inter- faces, for all subjects ($n = 16$).	64
Table 6 – Average agreement with the statements (1 = strongly disagree; 5 = strongly agree, $n = 16$).	65
Table 7 – Average task execution time (mm:ss) and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects ($n = 30$).	66
Table 8 – Percentage of task completion (%).	67
Table 9 – Average number of obstacles and standard deviation (SD) for all inter- faces, for all subjects ($n = 30$).	67
Table 10 – Presence Questionnaire scores.	68
Table 11 – Average agreement with the statements (1 = strongly disagree; 5 = strongly agree, $n = 30$).	70

Contents

List of Figures	10
List of Tables	12
1 INTRODUCTION	16
1.1 Motivation	18
1.2 Objectives	19
1.2.1 General Objectives	19
1.2.2 Specific Objectives	20
1.3 Outline	20
2 BACKGROUND	22
2.1 Teleoperation	22
2.2 Teleoperation Applied to Mining Industry	26
2.3 Mobile Robots	27
2.4 Robot Operating System (ROS)	29
2.4.1 Unified Robot Description Format (URDF)	32
2.4.2 RViz	32
2.5 Evaluation Methodology for Teleoperation Interfaces	33
2.6 Statistical Analysis	34
3 WORKING ENVIRONMENT SETUP	36
3.1 Mobile Robotic Platform	36
3.2 Integration on Windows	37
3.3 Integration on Linux and ROS	39
4 DEVELOPMENT OF THE TELEOPERATION INTERFACES	42
4.1 Basic Concept	42
4.2 Teleoperation Interfaces Using the Novint Falcon	43
4.2.1 Video Device	44
4.2.2 Car-driving Metaphor	44
4.2.3 Control Device	45
4.2.4 Force Rendering	45
4.3 Teleoperation Interfaces Using the Phantom Omni	49
4.3.1 Video Device	50
4.3.2 Control Device	50
4.3.3 Force Rendering	50

4.3.4	Map	53
5	EXPERIMENTS DESIGN	55
5.1	Evaluation Methodology	55
5.2	Experimental Procedure	56
5.3	Test 1	56
5.3.1	Participants	57
5.3.2	Taks	58
5.4	Test 2	59
5.4.1	Participants	60
5.4.2	Taks	61
6	EXPERIMENTS RESULTS AND DISCUSSIONS	63
6.1	Results - Test 1	63
6.1.1	Task and Execution Time	63
6.1.2	Task Completion and Accuracy	64
6.1.3	Sense of Immersion	64
6.1.4	Final Interview	65
6.2	Results - Test 2	66
6.2.1	Task and Execution Time	66
6.2.2	Task Completion and Accuracy	66
6.2.3	Sense of Immersion	67
6.2.4	Final Interview	68
6.3	Discussion	70
7	FINAL CONSIDERATIONS	71
7.1	Conclusions	71
7.2	Contributions	72
7.3	Future Work	72
7.4	Publications	73
	BIBLIOGRAPHY	74
8	ADAPTED PRESENCE QUESTIONNAIRE	79
9	FINAL INTERVIEW APPLIED IN TEST 1	82
10	FINAL INTERVIEW APPLIED IN TEST 2	84
11	IROS 2017	86

12	SBAI 2017	88
13	ABWEEK 2017	103

Chapter 1

Introduction

The mining industry is characterized by its high investments in capital and time. Such investments involve, at different stages of development, inspection, monitoring and manipulation activities in hazardous or difficult access environments. With a long history, automation is each day more present in mining processes, as companies look to extract minerals more efficiently and more safely (BARKER, 2017).

Mining companies are able to boost production efficiency and reduce operations costs through automation. Companies that adopt automation early will not only increase their bottom lines substantially, but will also improve their processes and have an advantage over those who take too long to think things over (SUBRAMANIAN, 2017).

A recent report from The World Economic Forum (DIGITAL..., 2017) explores the impact and transformations caused by digital technologies in the mining and metal industries. One of the highlighting findings is that the use of autonomous machines could create \$56 billion of additional value for the industry, since they can operate continuously through the year at high productivity levels.

Within its operations in Brazil, the mining company Vale S.A. has a pilot project for an autonomous mine under development at the Brucutu mine. The project, which has nine autonomous trucks, one autonomous drilling rig, one teleoperated tractor and one autonomous truck for loading explosives in development, is focused on more efficient and safe methods through the use of automation. In addition, other automated systems are used in different operations of the company such as, for example, the robotic system applied in the implementation of the S11D Railroad Branch (MOURÃO, 2014).

In cooperation with the *Instituto Tecnológico Vale - ITV* (Vale Institute of Technology), Vale aims a broader use of automation within its operations. The institute researches, applies and proposes concepts and technologies that aim at the automation, optimization and integration of mining processes from the mine (geology and mining) and mineral processing to logistics.

The work presented in this master's thesis was developed at the ITV as a part of a broader project that aims the development of a conceptual framework that enables the analysis and validation of the application of teleoperation techniques in mining equipment. These equipment could be either used for exploration, engineering or extraction. More

specifically, this framework will permit the analysis of which information is relevant and help the operator during the teleoperation of the equipment.

The framework should consist of an immersion module - which aims to create immersion scenarios to the operator and where his actions and interactions with the virtual environment can be captured - and of an operation module, in which the equipment and other devices can navigate and iterate with the real environment, based on operator's actions.

In the scope of this project, the work described in this master's thesis represent the initial step taken, which comprises the execution of proof-of-concept tests in laboratory using a robotic system. The experiments consisted of guiding the robotic platform in a scenario containing obstacles, using the different teleoperation interfaces developed using known teleoperation techniques.

To provide a proper solution while developing a teleoperation interface, it is necessary to deal with different challenges. Teleoperation systems provide information to and require commands from the user. Therefore, the first challenge is to deal with the feedback information that will be sent from the system to the user. Secondly, communication have to be established and problems such as delays can appear. Finally, a proper control architecture has to be chosen, which represent the connection level established between system and user. In this work, only the first challenge is addressed, by analyzing the effect of different information feedback.

Based on the literature survey, different teleoperation interfaces schemes consisting of video and haptic devices are analyzed under different aspects and the user point of view is taken into account. Moreover, the user himself is analyzed through the evaluation of different profile characteristics effects in teleoperation performance. The goal is to analyze the force feedback and different visual feedback effects during teleoperation and to evaluate which predefined users characteristics can contribute to better performance during teleoperation.

To perform the tests, a commercial robotic mobile platform Seekur Jr with a series of embedded sensors and devices is used. This platform can be programmed in such a way that it operates emulating a mining equipment and for practical application-oriented tests, different operations from a mining process can be used as application of study (e.g. explosive charging or excavators operations). For the purposes of this work, interfaces for the control of the robotic platform locomotion were analyzed.

In order to evaluate the influence of interface characteristics and users profile on per-

formance during teleoperation, two experiments were conducted. The first experiment was designed to analyze the effect of force feedback on teleoperation performance. In sequence, considering the results obtained from experiment one, the second experiment was designed aiming improvements on the interfaces and the analysis of user profile into more details.

During the experiments different types of data such as task execution time and number of collisions were recorded and analyzed. Given the experiments design, ANOVA tests were used for comparing the results for statistical differences.

Two different haptic devices were used as control devices in the experiments: the Novint Falcon and the Geomagic Touch (previously known as Phantom Omni). As video devices, an Axis P1224E camera and the MobileRanger stereo vision camera embedded on the platform were used. Implementation was done using the Robot Operating System (ROS), with the program written in Python and C++ programming language.

1.1 Motivation

The utilization of autonomous equipment has grown as one of the most efficient ways to improve productivity and operator's safety, while reducing production costs. However, mainly due to tasks inherent challenges, in some cases, the operator's intervention is still required, even if minimal. In this point, the utilization of teleoperated equipment rises as a relevant solution to the problem.

Teleoperation is seen as one of the earliest aspects of robotics and it can be defined literally as robotics at a distance. In teleoperation systems, any higher level decision or planning is made by the human user, while the robot is merely responsible for the system's mechanical implementation.

The usage of teleoperation techniques in different applications has been studied for years and different solutions have been proposed to solve a diverse range of problems. The main challenge while implementing a teleoperation interface is establishing convenient ways of creating a realistic projection of the remote environment onto the virtual environment in such a way that the operator feel immersed and present in the real environment.

In the mining industry, the main motivation for using teleoperated systems is the operator's safety. With the usage of teleoperated systems, the operator can be removed from hazardous environment without compromising task execution. Moreover, with such systems it is possible to achieve more efficient and standardized execution.

While considering the possible target applications of such system within the mining industry, four operations can be listed as examples:

1. **Teleoperation of Excavators**

Considering the technical challenges of developing a full autonomous excavator, the teleoperation of such equipments is the most promising way of reducing human exposure in such operation.

2. **Mineral Analysis**

Considering the criticality of sampling and analyzing the mineral quality, in order to optimize the extraction planning, samples are collected and the mineral composition from a mine or a pile is analyzed. In such application, teleoperated systems could allow analysis to be made *in situ*.

3. **Monitoring Conveyor Belts**

Considering how critical the conveyor belts are for Vale's operation process and the challenges that are associated with the maintenance of such equipments, which are crucial for material transportation. Usually the support structure of the conveyors belts are located in high distances and the inspection task, either on the mine or on the port, involves working at height, which not only increases inspection costs, but also operation risk. Therefore, the possibility of remotely inspecting such structures reduces costs and enables more frequent inspections, which prevents potential breakdowns and operational losses, not to mention that it makes it possible to remove the operator from hazardous areas.

4. **Explosive Charging**

Considering, once again, the high risk to which the operators are exposed to and the time required to perform the task, teleoperation systems could represent expressive advantages when used in the process of explosive charge in the mining industry.

1.2 Objectives

The objectives aimed by this work can be divided in general and specific. These objectives are listed below.

1.2.1 General Objectives

- Perform a preliminary analysis to identify possible relevant information that can effectively contribute to a more efficient and safe teleoperation of an equipment;
- Analysis of the utilization of an evaluation methodology for teleoperation interfaces.

1.2.2 Specific Objectives

- Theoretical study about teleoperation interfaces;
- Theoretical study of the application of automation and teleoperation in mining industries;
- Familiarization with the robotic mobile platform Seekur Jr;
- Integration of the devices into the Windows operating system;
- Integration of the devices into the Linux operating system;
- Familiarization with ROS and integration of the devices into this system;
- Project and implementation of local and remote subsystems, composed by the interfaces with the users and the environment;
- Conduction of proof-of-concept tests in laboratory.

1.3 Outline

The remaining parts of this document is organized as follows:

Chapter 2 presents a background on teleoperation of equipment. This chapter summarizes some of the literature studied and used as theoretical support during the development of this thesis. At this point, a brief review on the teleoperation concept and its associated challenges are presented. In sequence, the motivation for the use of teleoperation is shown through some practical examples in the mining industry. A review on mobile robots and the robotic operating system used for development in this work is also introduced. Finally, the evaluation methodologies used are discussed.

The working environment setup is presented in Chapter 3. This chapter describes in more details the mobile robotic platform used for development and the processes of familiarization and integration of its devices in the desired target system in order to setup the working environment.

Chapter 4 describes the developed teleoperation interfaces. Once again, in this work only the problem of information feedback to the user during teleoperation is addressed. The prototypes containing video and haptic devices are listed and their particularities are presented. In this chapter, the haptic devices used for controlling the robotic platform are introduced and the control logic, as well as the force feedback rendering process are described in details.

Chapter 6 has a detailed description of the two experimental tests performed to evaluate the interfaces are detailed. It starts by describing the evaluation methodology based on questionnaires that was used to evaluate the teleoperation interfaces developed. In sequence, the experimental procedure followed is presented, including tasks layout and participants selection, as well as the hypothesis that were being tested.

Finally, Chapter 7 presents conclusions, future work and general final considerations about this work obtained from the two experimental tests performed to evaluate and validate the teleoperation interfaces designed.

Chapter 2

Background

At early stage of this project, a directed study was performed on some relevant topics covered in this work. Hence, this chapter summarizes some of the papers and works read and that were used as a theoretical support throughout the development of this thesis.

Section 2.1 covers the definition and a brief application review of teleoperation, as well as the challenges associated with it. In sequence, Section 2.2 describes some examples of its application in the mining industry. In sequence, Section 2.3 does a short review on mobile robots followed by Section 2.4, which describes the Robot Operating System (ROS) used in the development of the interfaces. Finally, the evaluation methodology used is presented on Section 2.5 and the methodology used to evaluate the results is briefly described on Section 2.6.

2.1 Teleoperation

In robotics, teleoperation is seen as one of its earliest aspects and it can be defined literally as robotics at a distance. In teleoperation systems, any higher level decision or planning is made by the human user, while the robot is merely responsible for the system's mechanical implementation. In essence, the *brain* is removed or is distant from the *body* (NIEMEYER; PREUSCHE; HIRZINGER, 2008).

The term teleoperation or telerobotics is usually used to imply that there is a barrier between the user and the controlled system. However, this barrier can be overcome through the remote control of the robot in the environment. Important to notice is that this barrier can be imposed, for example, by hazardous environments or scale. Figure 1 shows this definition of teleoperated systems.

Even though it is possible that the user and the robot are physically close to each other, a teleoperated system is always conceptually divided into two environments (NIEMEYER; PREUSCHE; HIRZINGER, 2008):

- **Operator-site:** contains the operator and all elements necessary to support communication with the user, such as joysticks, displays, headsets, haptic devices, etc.
- **Remote-site:** contains the robot and all sensors and actuators required to create the immersive environment.

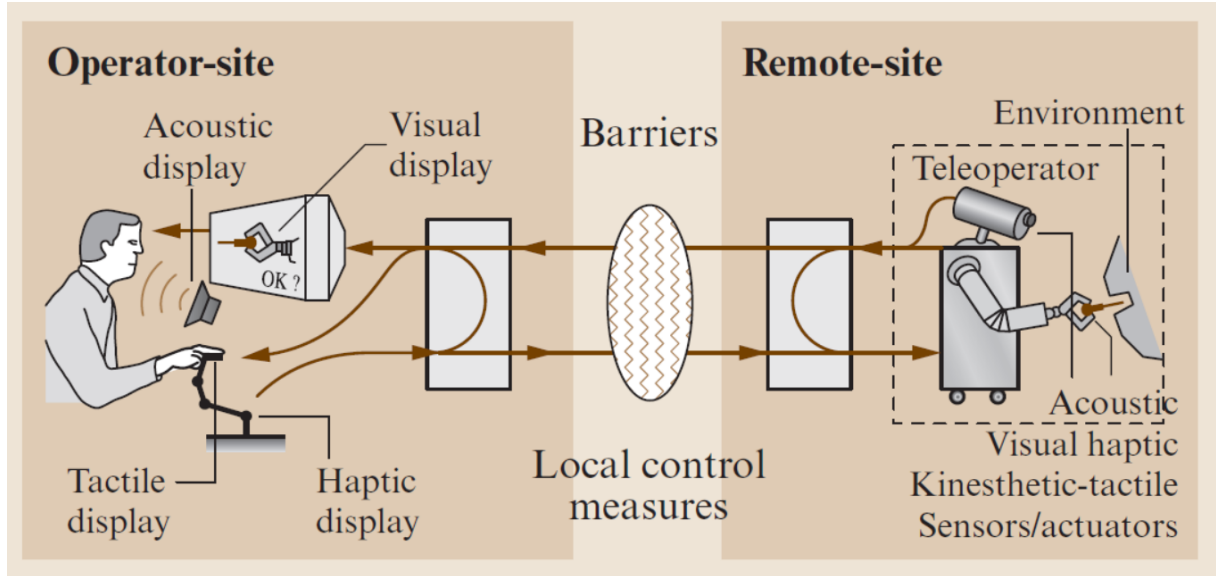


Figure 1 – Teleoperated system overview.
Source: (NIEMEYER; PREUSCHE; HIRZINGER, 2008)

The first work developed relating teleoperation systems dates back from the 1940s and 1950s, when Raymond C. Goertz (GOERTZ, 1952; GOERTZ; BEVILACQUA, 1952; GOERTZ, 1954) created systems that allowed humans to handle radioactive material. In general, the study of teleoperation has always been motivated by (NIEMEYER; PREUSCHE; HIRZINGER, 2008):

- human safety in hazardous environments (e.g. nuclear or chemical plants);
- the high cost of reaching environments (e.g. space);
- scale (e.g. micro-manipulation).

Hence, its application goes beyond different fields. As examples, we can list the tasks which implicate in dangerous situations for the human operators such as the handling of hazardous materials (KIM; JUNG; KIM, 1999; DESBATS et al., 2006; MUHAMMAD et al., 2007; MARTURI et al., 2016), operations involving explosives (BALTA et al., 2014; ERICKSON et al., 2014), rescue operations (MURPHY, 2004; MURPHY et al., 2008) and mining (CORKE et al., 2008; BONCHIS et al., 2014; YUSOF et al., 2015). In some cases, high costs in terms of time and money could be involved if required that the human operator reaches some specific areas such as in space robotics (YOSHIDA; WILCOX, 2008; BIBBY; NECESSARY, 2008) or underwater exploration (GARCÍA et al., 2017). In the same direction, some situations impose that it is not possible for the operator to move in certain areas because the space is too small, such as in minimal invasive surgery (SUNG; GILL, 2001) or other medical application in general (LOOS; REINKENSMEYER, 2008).

However, in order to be a suitable solution for any of these application, it is also

necessary to have an accurate definition of the teleoperation interface since its suitability to users can directly affect performance. That is because in teleoperation, despite the physical separation between operator and equipment, it is desired to provide the operator with a natural and realistic experience with the remote environment in such a way that he has the feeling of being present in the environment, but without its typical disturbances (noise, vibrations, heat, etc.) and with the possibility of increasing this perception by the inclusion of devices such as torque and force sensors, stereo or hyper-spectral cameras, microphones, etc.

According to Witmer (WITMER; SINGER, 1998) presence is the psychological state of being "there" mediated by an environment that engages our senses, captures our attention and promotes our active involvement. The level of presence observed depends on the fidelity of the sensory components, the nature of the interactions and required tasks and the concentration of the user.

To provide a proper solution while developing a teleoperation interface, it is necessary to deal with different challenges. Teleoperation systems provide information to and require commands from the user. Therefore, the first challenge is to deal with the feedback information that will be sent from the system to the user. Secondly, communication have to be established and problems such as delays can appear. In such cases, different approaches can be used to solve the problem (NATORI et al., 2010; LU; HUANG; LIU, 2017; JIA; XI; BUETHER, 2011). Last but not least, a proper control architecture has to be chosen. Three main categories are usually defined: 1- direct control, 2- shared control and 3- supervisory control (NIEMEYER; PREUSCHE; HIRZINGER, 2008). These architectures represent the connection level established between system and user. In this work, we only deal with the first one, by analyzing the effect of different information feedback.

With the different possible applications, teleoperation interfaces with specific characteristics can be developed. Usually, the interfaces differ from each other with respect to the information that is provided to the operator during teleoperation: images of different cameras (mono and stereo, for example), force feedback, audio feedback, equipment slope, etc.

Different works proposed in the literature have dealt with the teleoperation of mobile robots by means of force and video feedback. The use of force feedback has shown itself as capable of improving operators perception of the surroundings of the robot. However, in many studies no significant improvement was found in terms of task completion time. In (LEE et al., 2005), a teleoperation interface consisting of video and force feedback in a shared autonomy scenario was tested in both virtual and real environments and results

indicated an improvement in performance without degradation of navigation time.

With similar interfaces, in (DIOLAITI; MELCHIORRI, 2002) and (NADRAG et al., 2011) the force feedback was computed on the basis of the obstacles surrounding the robot and showed better performance. The issue of time delay in communication was addressed in (NADRAG et al., 2011) and in (LINDA; MANIC, 2011), which proposed a fuzzy algorithm for haptic teleoperation that was able to improve operator's awareness of unconstructed environments.

On the other hand, in (MITSOU; VELANAS; TZAFESTAS, 2006) the visual feedback is replaced by a real-time occupancy-grid map and is used to compute the virtual force. After performing tests in a simulated mobile robot, results showed improvement in both navigation time and operator perception of the remote environment.

Based on the literature survey, in this work different teleoperation interfaces consisting of video and haptic devices are analyzed under different aspects and the user point of view is taken into account. The interfaces contained different types of image (mono or stereo) and a haptic device (with or without force feedback). Moreover, the user himself is analyzed through the evaluation of the effect of different profile characteristics in teleoperation performance. The goal is to analyze the effects of the force feedback and of different visual feedback during teleoperation and to evaluate which predefined users characteristics can contribute to better performance during teleoperation.

In other words, the idea is not only implement such systems, but also to validate them in face of the user and to analyze how specific characteristics of the system can affect performance during teleoperation. This validation should include the analysis of aspects that affect the user's sense of immersion and his general satisfaction with the teleoperation.

To validate the feasibility of using the interfaces, two proof of concept tests were conducted in laboratory using a commercial mobile robotic platform. The experiments consisted of guiding the robotic platform in a scenario containing obstacles, using the different interfaces. The interfaces were evaluated by means of a methodology which uses questionnaires that focus on analyzing how controller characteristics and user comfort with the device increase the sense of immersion and affect performance. In addition, through a final interview, characteristics of the operators that might indicate a more suitable operator profile could also be obtained. This evaluation methodology is described in more details in Section 2.5.

2.2 Teleoperation Applied to Mining Industry

The mining industry is characterized by its dynamic behavior and constant evolution. Such aspects make the environment difficult to alter to suit the application of automated machines (CORKE et al., 2008). On the other hand, the advantages of using automated systems in such environments are evident in aspects such as operator's safety and increased productivity levels through continuous operation.

The remote control is often used as a good first step towards automation. In this case, mining machines are converted into mining robots, as the market still waits for the development of purpose-built robots (CORKE et al., 2008).

In underground mines, for example, automation is applied to the main equipment used in the transportation process: the LHD-type (load-haul-dump) loader, which picks up the ore from the extraction point and brings in to underground crushers. The automation of this equipment has been investigated for more than three decades and different solutions are proposed to solve the issue of localization and guidance in underground environment. A well-known example is the system described in (ERIKSSON, 1991), which used buried wires in the road to guide the LHD. A different approach was described by (VAGENAS, 1991), which proposes the use of a white painted line on the floor.

Up to today, studies are addressing the challenges, as well as the benefits of the automation of such equipment (GUSTAFSON et al., 2017; WU et al., 2017). Another relevant approach is considering the performance and maintenance perspective, for example. This problem is extensively addressed by (GUSTAFSON, 2011), which explores the maintenance actions connected to automated LHDs.

In the transportation process, excavators are the most commonly used equipment for moving the material to trucks or other transport mechanisms. Due to technical difficulties in obtaining a fully autonomous excavator, teleoperation techniques have been extensively applied in order to optimize such operation.

A wireless control station for the remote control of a real excavator system is proposed in (MOON et al., 2009). The system was tested on an experimental robot excavator and achieved the purpose of increasing operator's safety. However, communication delays decreased overall system performance, demonstrating the opened space for more research.

A more recent work is presented by (FUKUI et al., 2017), which describes the use of machine learning for an imitation-based control of automated ore excavators. Also aiming an autonomous excavator, (PARK et al., 2017) describes the development of an intelligent

excavator by means of a virtual prototype.

Focused on visual feedback, (LE; LEE; YANG, 2017) aims to improve the quality of visual feedback by replacing the conventional LCD displays with a head mounted display (HMD). Experimental results conducted on an excavator showed improved performance, while allowing more mobility and flexibility to the operators.

Finally, the process explosive charging is another of the activities in which the advantages of using teleoperation are evident. Considering the high risk to which the operator is exposed to and the time required by the task, the teleoperation of the equipment has the potential of increasing the efficiency of the process and the safety of the operator. However, many challenges are associated with this task: localization of the holes, preparation of the detonation device and insertion of the hose into the hole, for example.

The RECS system (BONCHIS et al., 2014) is an example of such application. In this case a truck equipped with a robotic manipulator is used for the automatic explosive charging. The system is able to detect the holes through image processing, as well as plan and control effectors' trajectory.

2.3 Mobile Robots

As the name itself indicates, mobile robots can be defined as robots that can move around places. Unlike the commonly used industrial manipulators, mobile robots are able to freely move within a predefined workspace to achieve desired goals (TZAFESTAS, 2013).

As the basic principle of mobile robots is locomotion, it is just logical to realize that they can move around in different environments: ground, water and air, for example. With that, it follows that many possibilities exist while considering locomotion mechanisms. Also interesting to notice is that these mechanisms find great inspiration in their biological counterparts. For example: walk, jump, crawl, run, swim, fly, etc.

Because of its relatively simple mechanical implementation and efficiency, wheel has been the most common locomotion mechanism for mobile robots (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). For wheeled mobile robots used on the ground, two types of steering can be defined: front-wheel or skid steering.

The first one is characterized by the nonzero turning radius, which is limited by the length of the robot and the maximum steering angle (COOK, 2011). On the other hand, robots with skid steering have independent wheels control. This makes it possible to make

the robot turn without actually moving it from its current place. These two schemes are pictured in Figure 2.

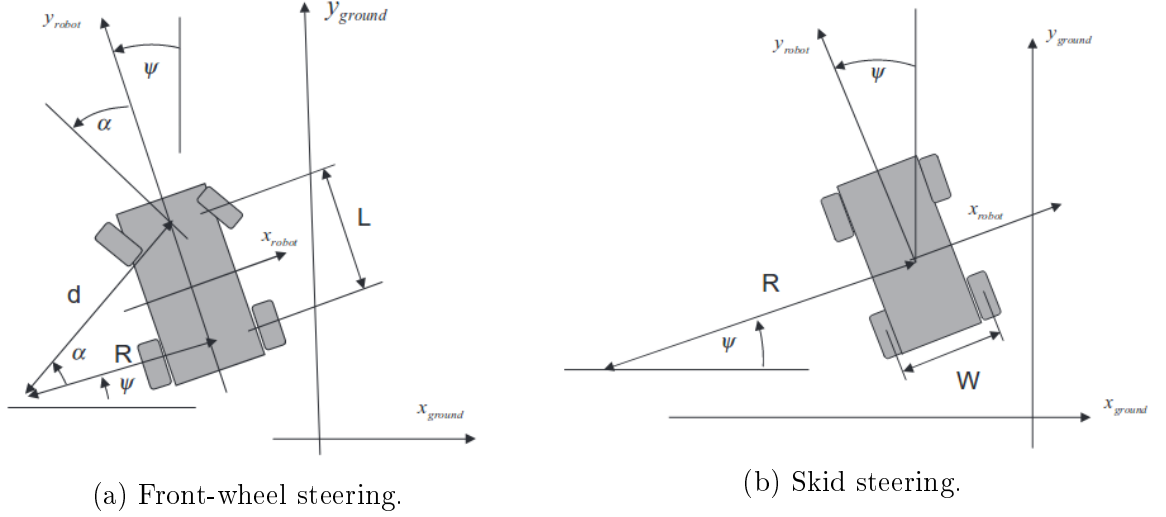


Figure 2 – The two possible steering schemes for mobile robots (COOK, 2011).

It is possible to operate mobile robots in different ways (COOK, 2011). One of the possibilities is exactly by means of teleoperation. In this scenario, the operator provides commands to the robot and, as discussed before, sensorial information feedback is necessary to provide additional information to the operation and help him selecting his actions and control decisions.

Real applications of mobile robots are usually characterized by the absence of the human operator in the site. As such, mobile robots are especially well suited for (DUDEK; JENKIN, 2010):

- Inhospitable environments that can be very dangerous to the operator or that implies in high costs to be reached;
- Remote environments to which is too difficult or expensive to send the operator to;
- Demanding tasks in terms of fatigue or duty cycles.

When we consider the application in the mining industry, for example, it is possible to see the room for mobile robots. The environment is dangerous to the operator, with the possibility of rock fall and contamination from dust, for example. Besides, it is also a remote environment in which the operator sometimes have to travel along the mine until he can reach the equipment.

2.4 Robot Operating System (ROS)

The Robot Operating System, most commonly known as simply ROS, is a flexible framework for writing robot software (FOUNDATION, 2018a). Basically, ROS consists of a collection of libraries and tools developed by a large number of people cooperating with each other around the world to create this open-source environment that simplifies the task of creating complex and robust robot behavior across a wide variety of robotic platforms.

ROS provides services for hardware abstraction, low-level device control, communication via messages, as well as package management. For that, ROS automatically handles possible dependencies, communication, linking and parallel execution.

The ROS architecture has been designed and divided into three levels of concepts (FERNANDEZ et al., 2015):

- The File System Level;
- The Computation Graph Level;
- The Community Level.

The file system level is used to centralize the build process of a project. This level represents the ROS structure that organizes the project into a folder structure, as can be seen in Figure 3.

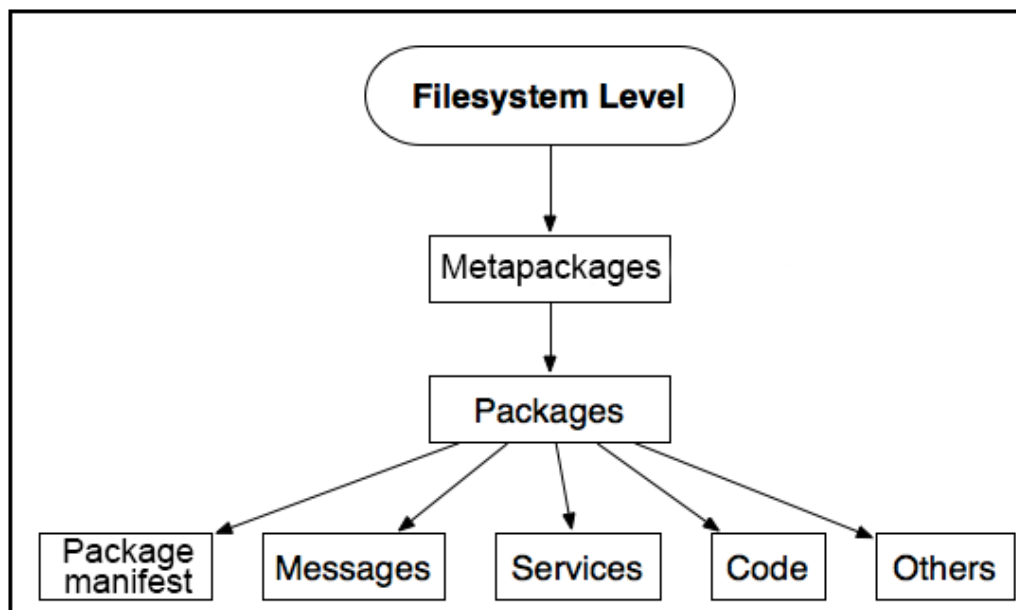


Figure 3 – Filesystem level structure of ROS.

Source: (FERNANDEZ et al., 2015)

The packages form the atomic level of ROS and they have the minimum runtime

execution program code within ROS: the node. The purpose of creating packages is to organize the development and provide an organized manner to reuse code. Associated to each package there is a package manifest. The manifest contains information about the package, such as dependencies, license, author, compilation flags, etc. A functionality of ROS is that packages can be grouped and form the so called metapackages.

An essential feature in ROS is the communication between the processes. This is done through messages and services. A message is the information that is transferred between the processes and ROS offers a large range of standard messages types, as well as the possibility of customization and creation of own types. The services define the request and response data structures for services provided by processes in ROS.

The Computation Graph Level (Figure 4) is where communication between processes and systems occurs. This layer is basically formed by the nodes, topics, services, messages, bag files, parameter server and the master.

The nodes represent the functional units in ROS (processes) and can be compiled, started and stopped individually. Nodes can communicate with each other using a publisher-subscriber model through messages published in topics. Topics can be seen as buffers of data where node can publish or subscribe to messages without the need of a direct connection between the nodes. Figure 5 shows how this publisher-subscriber scheme works in ROS.

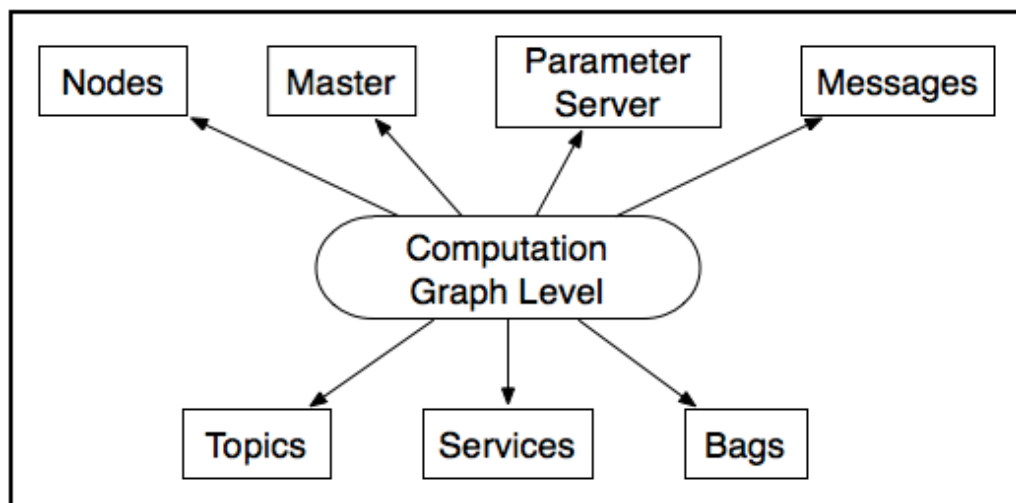


Figure 4 – The computation graph level of ROS.
Source: (FERNANDEZ et al., 2015)

All the ROS operations are managed by the ROS Master. The master is responsible for setting up the necessary connections between the nodes, as well as providing registration of names. It is mandatory to have at least one master in order to have ROS running as it is responsible for tracking all the other components of the system (nodes, topics,

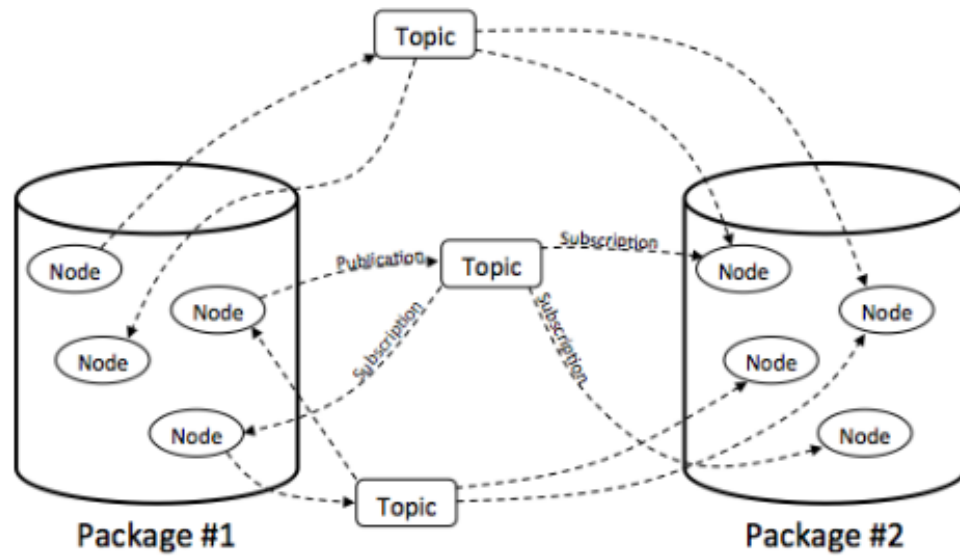


Figure 5 – Scheme of how nodes publish and/or subscribe to topics in ROS in a many-to-many relation-like.

Source: (LUM, 2015).

services, messages, etc). The diagram in Figure 6 shows how a master works setting up the connection between two nodes.

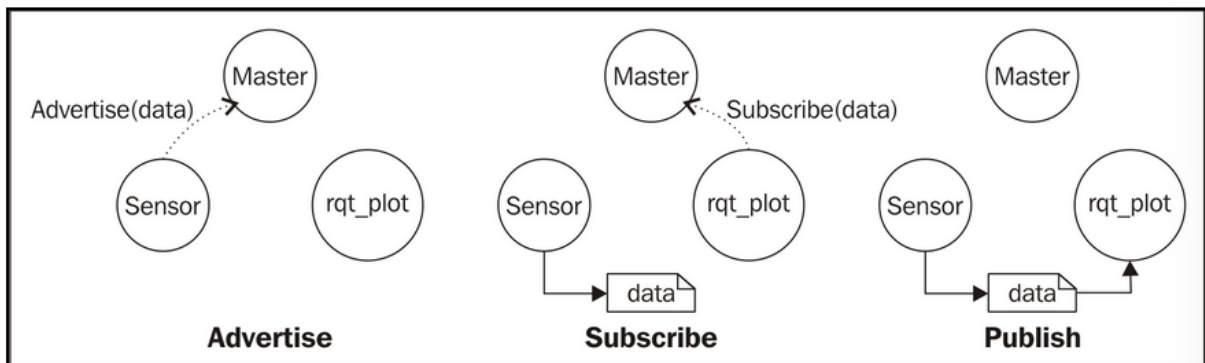


Figure 6 – Connection setup between two nodes by a ROS master.

Source: (FERNANDEZ et al., 2015).

Finally, the ROS architecture is composed by the community level. This level provides the resources that re-insures the main purpose of ROS: create an open-source community for the exchange of softwares for robotics.

In this level we find the distributions, all the code repositories, documentation Wiki, mailing lists, etc. Through the communication channels, developers around the world share their knowledge and contribute to the project.

ROS has several distributions available. Each distribution is basically one version of a set of ROS packages and is connected to a certain version of Ubuntu. In this project, the sixth and eighth versions of ROS were used. These versions are the ROS Groovy target

for Ubuntu 12.04 and the ROS Indigo, target for Ubuntu 14.04.

2.4.1 Unified Robot Description Format (URDF)

The Unified Robot Description Format (URDF) is an standard ROS XML format for representing a robot model for simulation, control, analysis and design tasks.

The URDF is nothing but a XML-file which enables the description of the physical properties of the robot, such as wheel size, moment of inertia, visual appearance and collision information, for example.

Two main units are used as base for an URDF model: links and joints. The links specify the physical bodies of the robot and they are connected by joints. Each link of the robot has a parent link and the joints are defined with their offset from the reference frame of the parent link and their axis rotation (LUM, 2015).

The generated URDF model for the Seekur Jr can be seen in Figure 7 and a snippet of the code used to generate it is shown in Code 2.1.

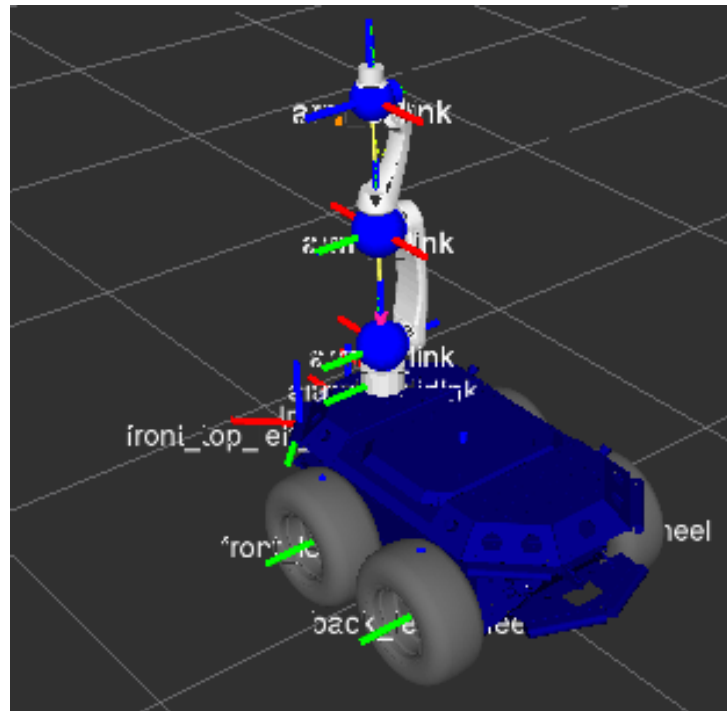


Figure 7 – Generated URDF model of the mobile robotic platform Seekur Jr.

2.4.2 RViz

The RViz is a tool in ROS which provides general purpose, three-dimensional visualization of many sensor data types and any URDF-described robot (FOUNDATION, 2018b).

Code 2.1 – XML code snippet for generating the URDF for the Seekur Jr robot.

```

...
<!-- BASE-FOOTPRINT -->
<!-- base_footprint is a fictitious link(frame) that is on
the ground right below base_link origin -->
5 <link name="base_footprint">
    <inertial>
        <mass value="0.0001" />
        <origin xyz="0 0 0" />
        <inertia ixx="0.0001" ixy="0.0" ixz="0.0" iyy="0.0001"
10 iyz="0.0" izz="0.0001"/>
    </inertial>
    <visual>
        <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0" />
        <geometry>
15     <box size="0.001 0.001 0.001" />
        </geometry>
    </visual>
</link>
...

```

Many of the standard ROS message types can be visualized in RViz, providing a robust tool for a complete three-dimensional rendering of the robot and all components related to it.

Figure 8 shows a screenshot of the RViz window showing the URDF model of the Seekur Jr, as well as navigation data information such as laser readings, maps and robot state.

2.5 Evaluation Methodology for Teleoperation Interfaces

Besides the definition of teleoperation interfaces, methodologies are needed to assess the suitability of these interfaces in the point of view of their users. This is because, despite the physical separation between operator and equipment, it is desired to provide the operator with a natural and realistic experience with the remote environment in such a way that he has the feeling of being present in the environment.

Proposals of methodologies to evaluate the performance of teleoperation interfaces from the point of view of the user have been studied for years. To a great extent, these proposals focus on developing measures to analyze the degree of presence and involvement of users during the accomplishment of teleoperation tasks.

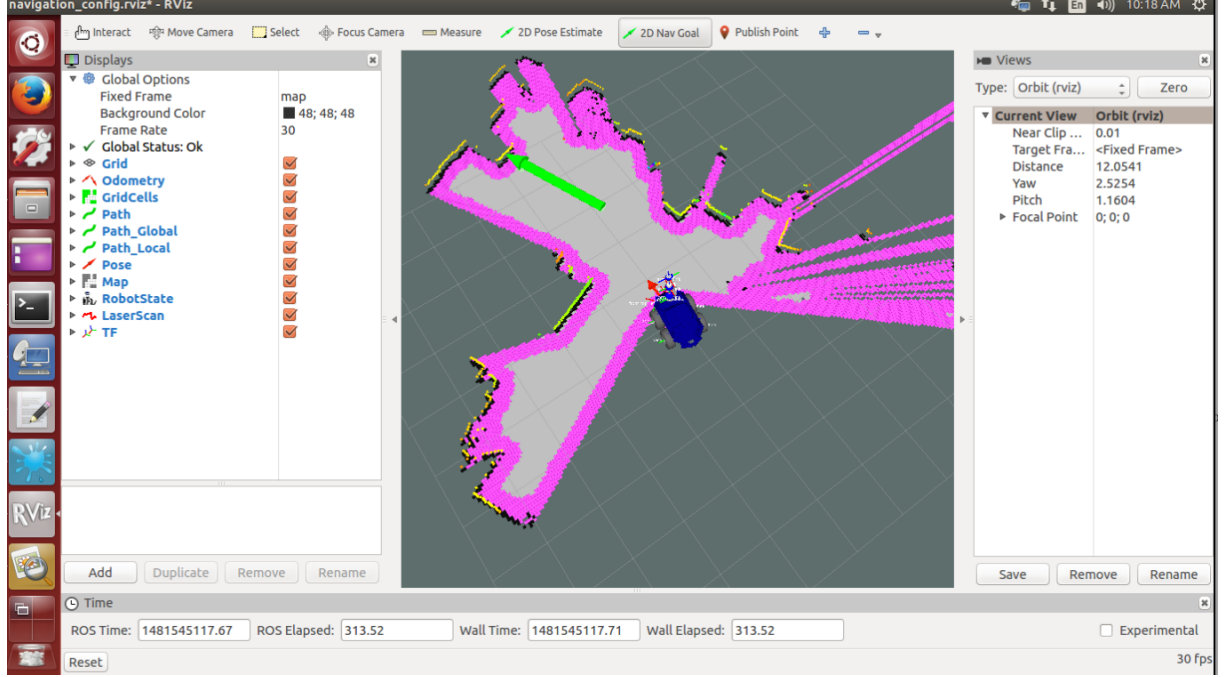


Figure 8 – RViz screen showing the Seekur Jr UDRF model and standard message data like laser scan and tf.

One of such methodologies is the Presence Questionnaire (PQ), a questionnaire widely used to evaluate the sense of presence and immersion of users of teleoperation interfaces (SALLNÄS; RASMUS-GRÖHN; SJÖSTRÖM, 2000; KECHAVARZI; SABANOVIC; WEISMAN, 2012; SILVA et al., 2016; LEE et al., 2016). This questionnaire has 33 questions and its items can be grouped into four sub-scales: (1) Involvement, (2) Adaptation/Immersion, (3) Sensory Fidelity and (4) Interface Quality. An adaptation of the presence questionnaire, together with a final interview, was used in the experiments to evaluate the developed interfaces.

2.6 Statistical Analysis

During experimental evaluation, a large amount of data can always be recorded. However, all this data is nothing but a number or record on a table unless something is done to extract useful information from it. Essentially, the purpose of realizing an experimental test is collecting data in order to validate an implementation or understand the behavior of the analyzed system.

In the scope of this project, from the data obtained with the questionnaires and interviews, some statistical analyzes can be conducted to evaluate the results obtained. In data analysis, before applying any information-extracting technique, ideally the quality of available data should be well known and, if possible, increased, once it is quite common that it contains disturbances, inconsistencies or even missing values. Hence, to prepare

the data used in this analysis, a preprocessing phase was added to the process. As the amount of data collected does not represent a huge data set, the preprocessing basically consisted of outliers removal. For the experiments carried out in this work the ANOVA test and the standard score (z-score) were used to evaluate the results.

The hypothesis technique Analysis of Variance (ANOVA) is used to evaluate the mean differences among two or more populations using sample data. Typically, the ANOVA test can be applied in three distinct situation, according to the experiment design (GRAVETTER; WALLNAU, 2016):

1. **Independent-measures design:** two or more independent samples are used to infer about differences between two or more unknown populations.
2. **Repeated-measures design:** only one sample in which individuals are tested in two or more different conditions is used to infer about the population differences among the conditions.
3. **Two-factor design:** two independent factors that can change simultaneously are used. This creates multiple combinations of the treatment conditions involving the variables. The ANOVA test then evaluates the differences attributed to each variable acting independently and to combination of the two variables interacting together.

Another well-known statistical test for comparing means is the Student test, most commonly known as simply t-test. Essentially, the t-test provides the same results as the ANOVA when only two samples are analyzed. For three or more samples, the ANOVA test is more suitable as the t-test would have a compounded effect on the final error of the result, therefore ANOVA allows a greater flexibility in the choice of the experiment design and was, therefore, chosen in this work.

As for the necessary comparisons between populations proportions, the Z-score was used together with a Z Score Calculator¹. The z score test is used to compare if two populations differ significantly according to one factor.

¹ available in <http://www.socscistatistics.com/tests/ztest/Default2.aspx>

Chapter 3

Working Environment Setup

After the theoretical study that generated the necessary background material for the development of this project, the implementation of the framework was started. This chapter describes the first step taken in development, which consisted of familiarization with the robotic platform and integration of its devices in the desired target system in order to setup the working environment.

3.1 Mobile Robotic Platform

The Seekur Jr (Figure 9) is a skid steer, four wheel drive mobile robotic platform for research and experimental application development (SEEKUR. . . , 2016).

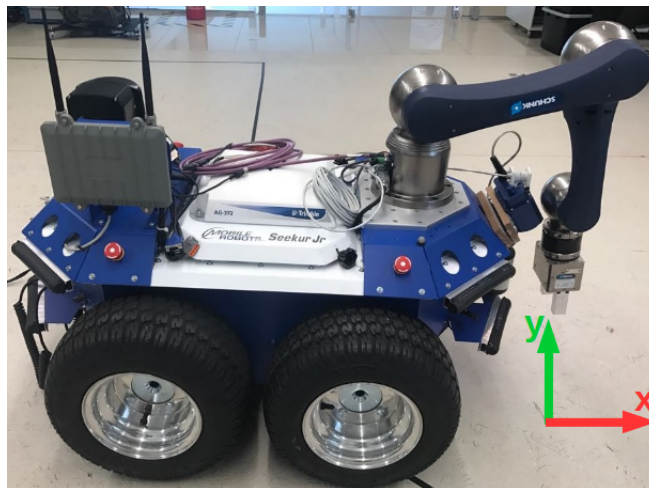


Figure 9 – Robotic platform Seekur Jr.

The platform includes several devices:

- Laser ranger finder SICK LMS-111;
- PTZ camera RVision SEE;
- Stereo camera MobileRanger C3D;
- IMU unit;
- GPS Trimble AgGPS 372;
- Wireless router M0n0wall;
- Bumpers.

The platform has a two-layer architecture, consisting of a micro-controller and an embedded computer. The embedded micro-controller runs the SeekurOS firmware, which is installed by the manufacturer, and works as an interface between the Linux operating system (Ubuntu 12.04) that runs on the embedded computer and the devices connected to the platform. An architectural scheme can be seen in Figure 10.

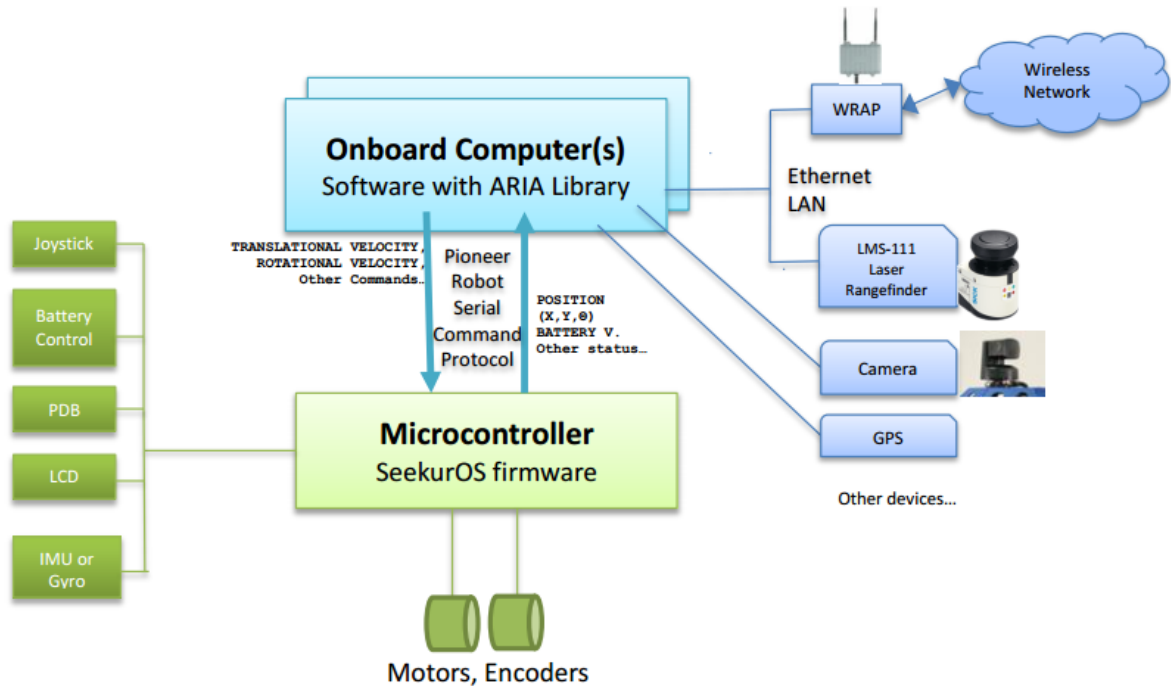


Figure 10 – Architecture scheme of the Seekur Jr.

Since the Seekur Jr robotic platform is a new acquisition for the robotics lab, the first step needed to develop the project was familiarization with the components embedded on it, as well as their integration into the Windows and Linux operating systems and basic operation verification. Thus, the following sections describe the activities developed and the results obtained during this stage.

3.2 Integration on Windows

Initial tests included operation of the Seekur Jr and each of the devices embedded on it using the applications provided by the platform manufacturer (Adept MobileRobots) for the Windows environment.

The Seekur Jr operates as the server on a client-server system, using the embedded computer to manage low-level communications with devices and generate intelligent controls for obstacle detection and avoidance, trajectory planning, localization and navigation. Using its SDK (Software Development Kit), the following tasks were performed:

- Together with the open source ARIA framework, which provides an interface for communication and control with basically all accessories:
 - teleoperation of the robot using the keyboard;
 - visualization of values read by the laser;
 - control of the PTZ camera and display of its images in the VLC player;
 - visualization of GPS readings;
- Together with the MobileEyes graphical interface:
 - visualization of the robot and of the laser readings (Figure 11);
 - access to position, speed and battery status information;
 - teleoperation of the robot through the ArNetworking library using the Drive Robot window;
 - autonomous navigation through the ARNL and MOGS libraries.

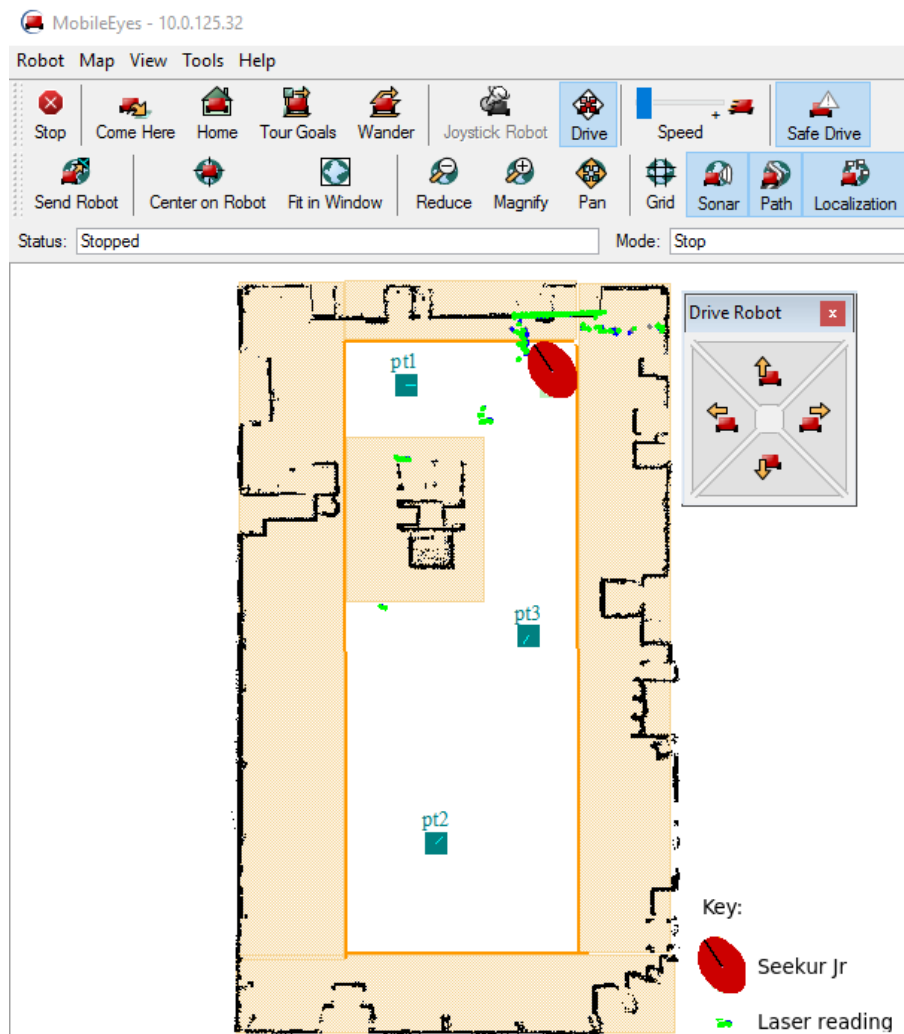


Figure 11 – Visualization of the Seekur Jr in MobileEyes software.

For devices that are added to the robot on demand, which, therefore, do not have interfaces implemented in ARIA, the following tests have been performed:

- **Stereo Vision Camera:**

The stereo vision camera provides data for a Focus processor connected to the Seekur Jr embedded computer. Using the Focus-based library application, it was possible to obtain the camera images, as well as the depth map image. These images can be seen in Figures 12 and 13, respectively.

- **Schunk Powerball Manipulator LWA4P:**

The Schunk robotic manipulator was controlled through the GUI (Graphical User Interface) provided by its manufacturer. With this interface, the manipulator can be sent to predefined positions.

- **GPS Trimble:**

The GPS has been tested in outdoor environment using the AgRemote software. With this software, it was possible to verify the number of satellites found. However, in the laboratory no signal is obtained. In this way, a possible alternative is to use the existing VICON camera system in the laboratory to determine the position of the Seekur Jr, if necessary.



Figure 12 – One of the images obtained from the stereo vision camera.

3.3 Integration on Linux and ROS

ROS was used for device integration and project development. In sequence, the procedure and the results obtained are described.

- **Unified Robot Description Format (URDF):**

The URDF format is an XML specification for describing a robot. With the URDF, it is possible to obtain the:

- description of robot kinematics and dynamics;
- visual representation of the robot;

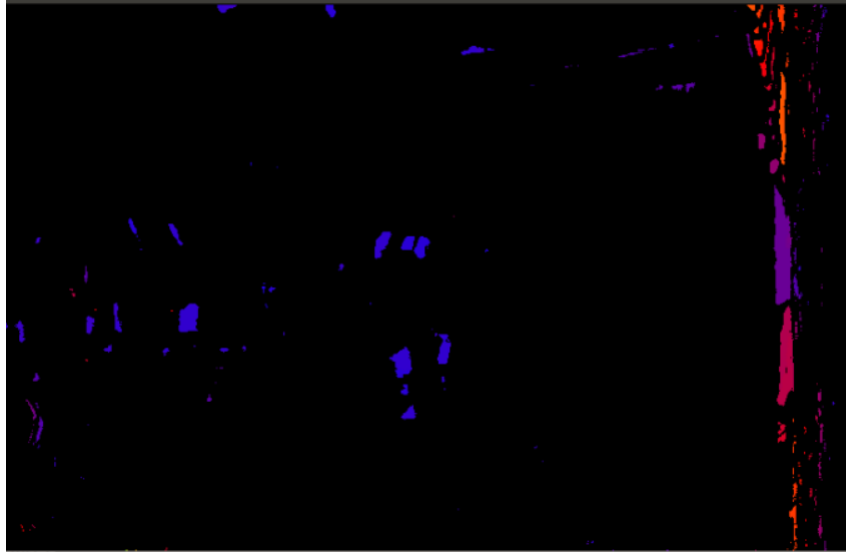


Figure 13 – Depth image obtained from the stereo camera.

- robot collision model.

An URDF model of the Seekur Jr was generated. Together with the mapping information obtained through the laser readings, this model allows the visualization - in conjunction with the MoveIt! software or the RViz software - of the device in the remote environment, generating a better perception about the environment in which the equipment is immersed. The generated model can be seen in Figure 14.

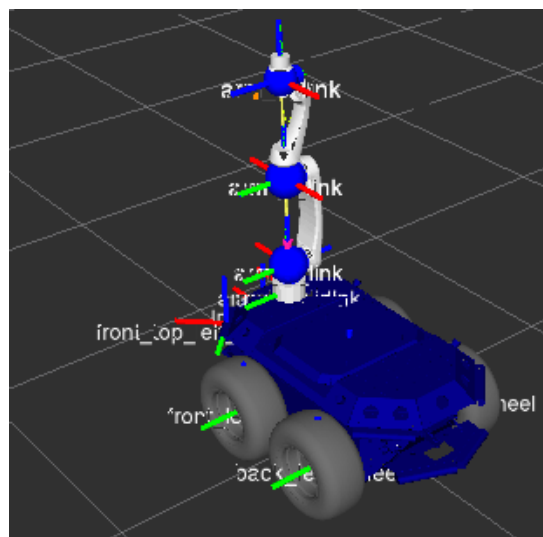


Figure 14 – URDF Model of the mobile robotic platform Seekur Jr.

- GPS Trimble:

GPS read information (latitude, longitude and height) was obtained through the *nmea_gps_driver* package.

- PTZ Camera:

Through the *gscam* package, it was possible to visualize the images in the RVIZ software. An ARIA-based package was also created to command the pan-tilt.

- **Stereo Vision Camera:**

By adapting the OPENCV-based codes from the Focus libraries to ROS, images were obtained from the camera MobileRanger C3D.

- **Schunk Robotic Manipulator:**

The *schunk_robots* package was used for the manipulator. It includes a series of packages that allow the communication, via USB/CAN ESD converters, with the Schunk manipulator. However, even though it is possible to control the manipulator with a joystick, this test showed inconsistencies with the arm responding to the commands only in some cases.

- **Seekur Jr Localization:**

Using the *p2os* package, it was possible to:

- obtain laser readings;
- teleoperate the robot via joystick and keyboard;
- control the PTZ camera;
- read status information, such as bumpers and battery status.

- **Novint Falcon:**

The Falcon haptic device was integrated into Linux through the open-source driver *libnifalcon* (MACHULIE, 2009). Based on the *bonsai* package (MARTIN, 2012) and using the *p2os_driver*, the *rosfalcon* package was developed, based also on an existing *rosfalcon* package. With this package, the positions of the axes were obtained and the resistance offered by the device in face of predefined conditions was manipulated.

- **Geomagic Touch (Phantom Omni):**

The Geomagic Touch haptic device was integrated into Linux through the Geomagic OpenHaptics Toolkit and the ROS package *geomagic_control*. With the driver in conjunction with the package, it is possible to obtain the axes positions as well as to setup up the desired force feedback.

- **Oculus Rift (SDK)** The Oculus Rift was integrated in Linux using the open source API OpenHMD and a ros package that is under development at the laboratory named *openhmd_ros*, which provides the bridging between the OpenHMD and ROS. This package allows us to put images onto the Oculus Rift and to read the IMU information from ROS nodes.

Chapter 4

Development of the Teleoperation Interfaces

After the integration and familiarization with the robotic platform and its components, prototypes of different teleoperation interfaces were developed. These interfaces contain video and haptic devices. The suitability of these prototypes were later on tested in the laboratory in experimental tests. The following sections describe each of the interfaces developed.

4.1 Basic Concept

Based on the background research, different teleoperation interfaces were development with the goal of analyzing which kind of feedback information is relevant to the operator. In this work, the force and video feedback were analyzed through different interfaces used to command a mobile robotic platform.

Video devices are frequently applied in teleoperation interfaces to provide immediate feedback about the remote environment. The simplest approach is to project monocular vision images on a conventional LCD. Most sophisticated and realistic applications, though, might make use of stereo vision cameras that are able to provide depth images. In the developed teleoperation interfaces, video devices were used to provide visual feedback to the operator about the environment around the robot.

To improve operator performance in simulated or teleoperated environments, it is also very common to make use of haptic devices with force feedback. These haptic interfaces seek to generate a compelling sensation that the operator is directly touching a real environment (HANNAFORD; OKAMURA, 2008).

Besides replicating or enhancing the touch feeling, haptic interfaces are also used to increase the perception of the real world. In these experiments, the force feedback was used in haptic devices to provide additional information about obstacles presence in the surroundings of the robot along the way.

While developing the interfaces, two different haptic devices were used: the Novint Falcon (Figure 15a) and the Phantom Omni (Figure 15b). Initially developed for games,

the Novint Falcon, a 3-DOF joystick has found space in several applications because it has the resource of force feedback and an affordable price (MARTIN; HILLIER, 2009; VANACKEN; BOECK; CONINX, 2010; RENON et al., 2013; DAVIES; MASKERY; JOHN, 2009).

On the other side, the Phantom Omni (also known as Geomagic Touch), a 6-DOF haptic device, is used in research, 3D modeling, OEM applications and more. It allows users to freely sculpt 3D clay, enhance scientific or medical simulations, increase productivity with interactive training and easily maneuver mechanical components to produce higher quality designs (PHANTOM..., 2016).



(a) The haptic device Novint Falcon.
Source: (GEOMAGIC..., 2017)



(b) The haptic device Phantom Omni (aka Geomagic Touch). Source: (THE..., 2017)

Figure 15 – The haptic devices Novint Falcon and Phantom Omni, used in the development of the different teleoperation interfaces.

It should be noted that, both the Falcon and the Phantom are commonly used for purposes of concept tests in the laboratory, thus differentiating themselves from joysticks developed for equipment control in mining industry.

These devices form the basis for the developed teleoperation interfaces that will be described in details in the following sections of this chapter.

4.2 Teleoperation Interfaces Using the Novint Falcon

The first teleoperation interfaces developed consisted of a video and a haptic device. The main purpose was to test the effectiveness of using the force feedback. Two teleoperation interfaces were developed using the Falcon. These interfaces (listed in Table 1) differ with regard to the use of the force feedback or not.

Table 1 – Teleoperation interfaces developed using the Novint Falcon haptic device.

Interface	Video device	Haptic device
1	monocular image and LCD display	without force feedback
2	monocular image and LCD display	with force feedback

The overview of the teleoperation system developed using the Novint Falcon haptic device is illustrated in Figure 16.

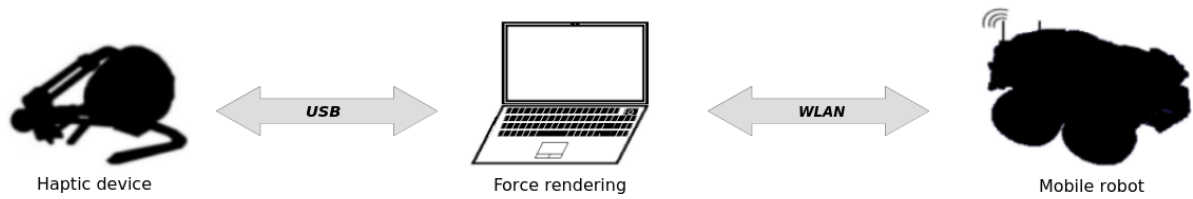


Figure 16 – Overview of the teleoperation system using the Novint Falcon haptic device.

The force feedback is computed based on the information about the environment around the robotic platform obtained from laser readings. The computed force is sent to the haptic interface, whose position is used to compute motion commands to sent to the mobile robot and that translates operator's intentions into movement. Moreover, images from the camera located in front on the robotic platform are projected in a display for the operator.

4.2.1 Video Device

As a video device, an Axis P1224E camera was integrated into the Seekur Jr in such a way that the images obtained were projected onto an LCD monitor, providing the images used by the operator to teleoperate the platform. As the camera was placed in the front part of the robot, it was only given to the operators the visual feedback of the environment in front of it, as can be seen in Figure 17.

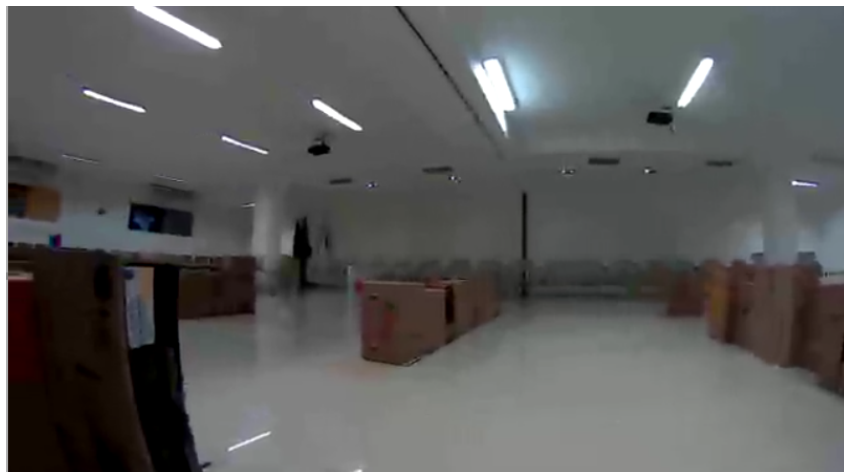


Figure 17 – Images from the Axis camera located in front of the robot that were provided to operators.

4.2.2 Car-driving Metaphor

To establish a control logic for mobile robots, it is common to create a car-driving metaphor, since their motion control is similar to driving a car. The main advantage of

doing such association is that it can be easily understood by users. By considering the 3D haptic joystick probe location projection (x, y) , it is possible to map robot speed and turn rate. Four different probe positions that translate to different motion commands are shown in Figure 18.

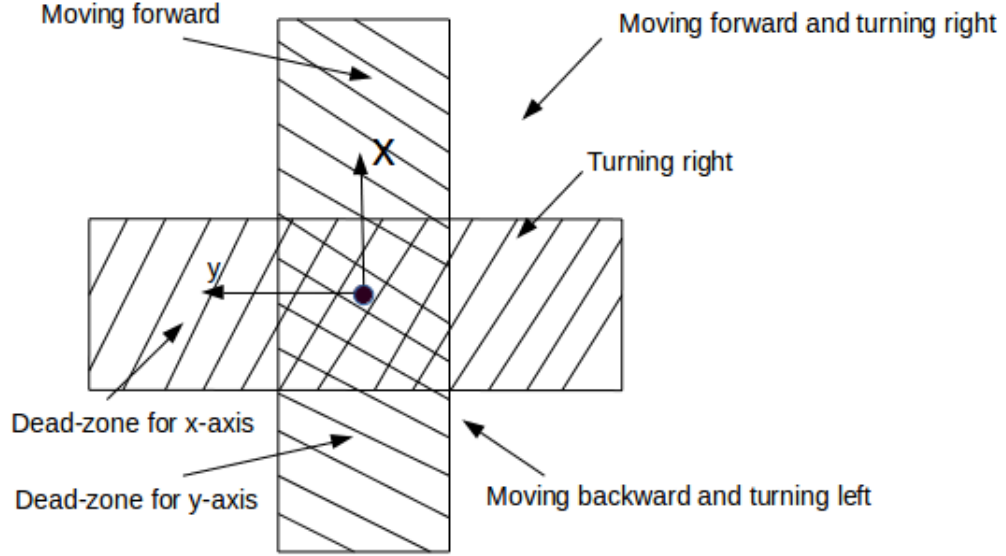


Figure 18 – Car-driving metaphor: mapping a logical point (x, y) to motion parameters. Adapted from (LEE et al., 2005).

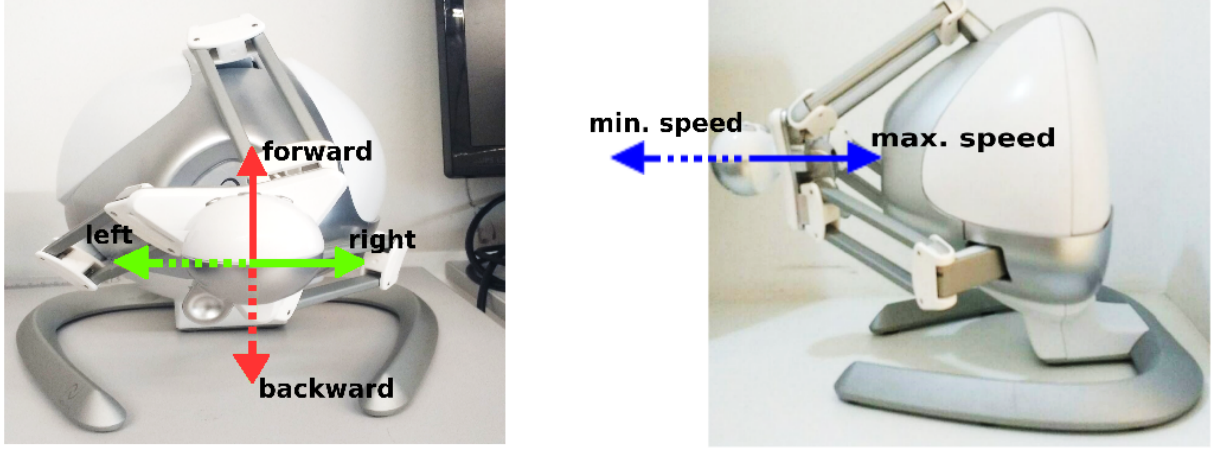
The zero speed or turn rate happens every time the probe position (x, y) is located inside the dead-zone. This dead-zone was established to prevent movement of the robot due to unintended users actions.

4.2.3 Control Device

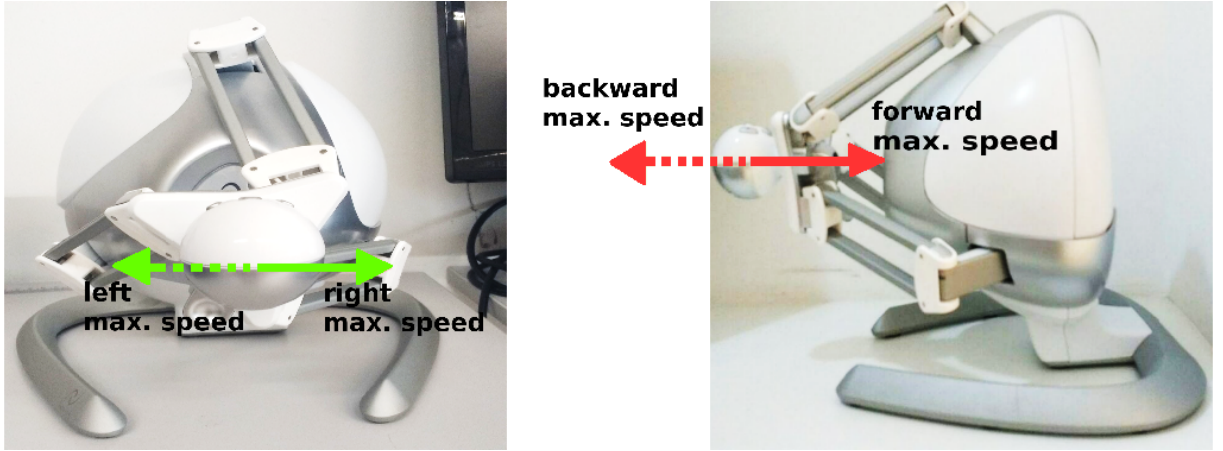
While developing the car-driving metaphor, two configurations of control were developed for the Novint Falcon. These configurations differ with respect to the axis used and the command associated to each one of them. The defined commands for configurations 1 and 2 can be seen in Figures 19a and 19b, respectively. During experimental tests, both configurations were used by operators.

4.2.4 Force Rendering

The force rendering process consists of the computation of a force felt by the user in contact with the haptic device. The direct control approach used on this work considers user's action to directly determine the movement parameters for the robot. When the user determines joystick probe position, the force that will be applied is calculated based on the position information of obstacles surrounding the robot.



(a) Commands for configuration 1 of the Falcon device.



(b) Commands for configuration 2 of the Falcon device.

Figure 19 – Commands for the two control configurations of the Falcon device.

Information about the distance and angle of detected objects were obtained from the laser range finder. This laser has a 270° field of view and an operating range from 0.5-20m. This information was then used to compute the forces to be applied in each direction x and y .

The force calculation was based on the concept of Bounding Boxes. In computer graphics, the bounding boxes method is widely used by developers as a tool in object collision detection, mainly because it is considerably simple. This technique consists on checking if there has been an intersection between a given object and a hypothetic (usually) rectangular-shaped contour that is usually placed over the object of interest.

In our context, the bounding boxes method was applied in the detection of obstacles along the trajectory of interest of our mobile robot. The implemented algorithm considers the case of a 2D circle-rectangle collision, in which the object of interest (robot) is represented by a rectangle of dimensions $w \times h$ and the objects points detected by the laser (the obstacles) are represented by a circle of radius r .

Figure 20 shows the relevant collision areas that should be considered while dealing with circle-rectangle collision.

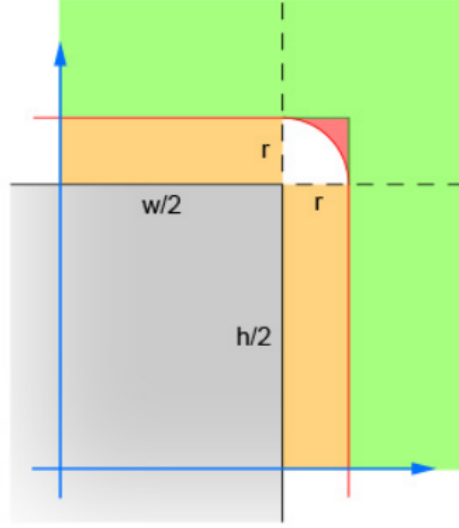


Figure 20 – 2-D circle-rectangle collision detection: relevant areas
Source: (JAMES, 2008)

Algorithm 1 was used for the obstacle collision detection. The first step is the calculation of the distance between the centers of the circle and the rectangle. This simplifies the algorithm and reduces the four quadrants to only one. Figure 20 shows the different areas in which the center of the circle can be for a collision to occur.

Algorithm 1 - 2-D circle-rectangle collision detection algorithm (JAMES, 2008).

```

1: function COLLISION( CircleObj circle, RecObj rec)
2:   distance.x = abs(circle.x - (rec.x + rec.width/2));
3:   distance.y = abs(circle.y - (rec.y + rec.height/2));
4:   if distance.x > (rec.width/2 + circle.r) then return false;
5:   end if
6:   if distance.y > (rec.height/2 + circle.r) then return false;
7:   end if
8:   if distance.x <= (rec.width/2) then return true;
9:   end if
10:  if distance.x <= (rec.height/2) then return true;
11:  end if
12:  cornerDistance = (distance.x - rec.width/2)2 + (distance.y - rec.height/2)2
13:  return (cornerDistance <= (circle.r)2)
13: end function

```

The information about the presence of obstacles in the surroundings of the mobile robot was then used to compute the force feedback to be applied in each direction x and y of motion. The idea of the force feedback is to prevent the robot from heading or rotating

in the direction of obstacles by providing information about the distance between the closest obstacle and the robot in the form of a force in the haptic device.

To determine the closest obstacle to be used for the force rendering, the distances projection onto axis y were calculated based on laser information about distance from laser and angle of reading. A calculation example is shown in Figure 21.

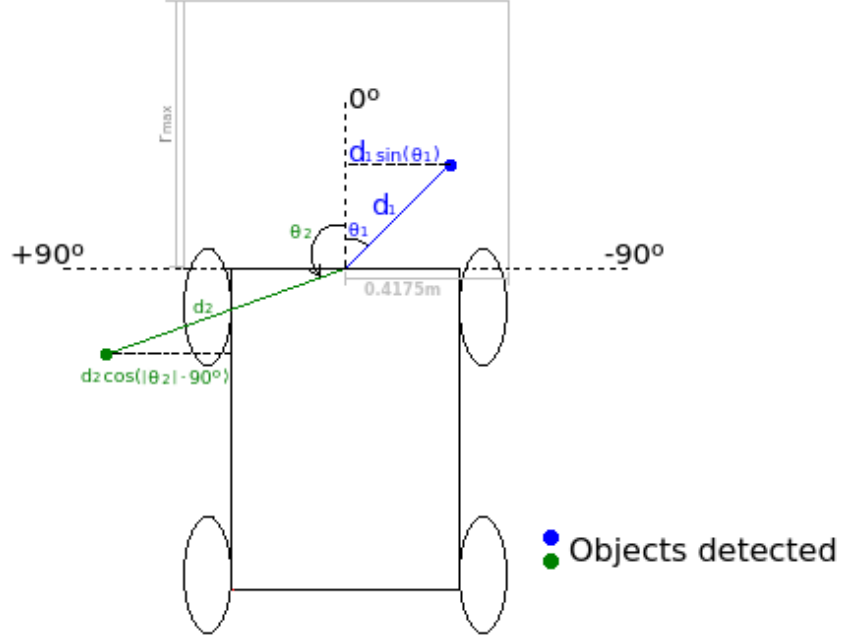


Figure 21 – Obstacles projection calculation during the collision computation. r_{max} is maximum distance within which detected objects are considered obstacles. The projections are calculated based on obstacle possible w.r.t the heading direction of the robot.

When the joystick probe position is represented by (x, y) , the force applied (F_x, F_y) will be given by:

$$F_x = \begin{cases} f_{+x}(d) & \text{if } x \geq 0 \\ f_{-x}(d) & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad F_y = \begin{cases} f_{-y}(d) & \text{if } y \geq 0 \\ f_{+y}(d) & \text{if } y < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

where

$$f_{\pm x} = \phi_{\pm x}(d_j) F_I \quad f_{\pm y} = \phi_{\pm y}(d_j) F_I \quad (4.2)$$

$$F_I = \frac{r_{max} - d_j}{r_{max} - range_{min}} (max_{force} - min_{force}) + min_{force} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
\phi_{-x}(d_j) &= 0 \quad \forall d_j \\
\phi_{+x}(d_j) &= \begin{cases} 1 & \text{if } d_j < r_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
\phi_{-y}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } p_{j_y} < w/2 \text{ or } (\theta_j < 0 \text{ or } |\theta_j| > 90^\circ) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
\phi_{+y}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } p_{j_y} < w/2 \text{ or } (\theta_j > 0 \text{ or } \theta_j < -90^\circ) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

$$p_{i_y} = \begin{cases} d_i * \sin(|\theta_i|) & \text{if } |\theta_i| < 90^\circ \\ d_i * \cos(|\theta_i| - 90^\circ) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4.5}$$

d_i = distance between i th object point detected and the robot.

j = index of $[\min_{i=1}^n [(p_{i_y})]]$.

d_j = distance between the closest object and the robot.

$range_{min}$ = minimum distance detected by the laser.

r_{max} = maximum distance within which detected objects are considered obstacles and start emitting a force.

min/max_{force} = limits for the desired force intensity, determined empirically.

The functions $f_{\pm x}$ and $f_{\pm y}$ represent the values of the x and y components for the force due to the closest obstacle detected within the r_{max} radius. The f_{+x} force, for example, is used when user tries to move the robot forward but there is an obstacle in that direction. The other f functions are used under the same idea, for the backward, turning left and turning right directions.

4.3 Teleoperation Interfaces Using the Phantom Omni

As it will be detailed further on, considering the results obtained from the tests using the interfaces developed with the Falcon, improvements were made and three new teleoperation interfaces were developed, this time using the Phantom Omni.

The three teleoperation interfaces evaluated are listed in Table 2. These interfaces also differ with regard to the information given to operators in order to provide assistance during teleoperation.

The overview of the teleoperation system developed using the Phantom Omni haptic device is illustrated in Figure 22.

Table 2 – Evaluated teleoperation interfaces

Interface	Video device	Haptic device	Map
1	monocular image and LCD display	without force feedback	with map
2	monocular image and LCD display	with force feedback	with map
3	stereo images and Oculus Rift	with force feedback	without map

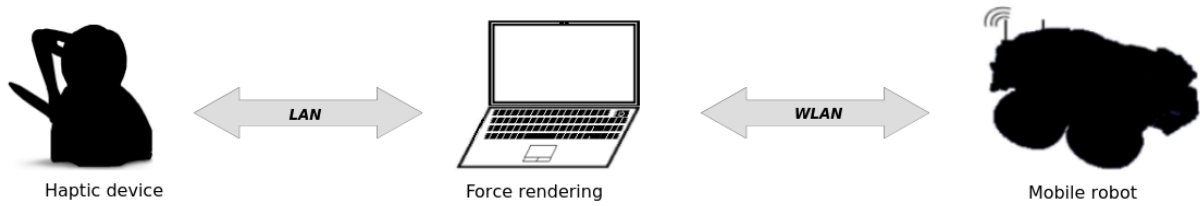


Figure 22 – Overview of the teleoperation system using the Geomagic Touch haptic device.

The car-driving metaphor described in Section 4.2.2 was also used in the development of the interfaces using the Phantom.

4.3.1 Video Device

Even though very common, using mono vision images has the disadvantage that the operator loses the sense of depth. An alternative is to use stereo vision images, which, by providing two views of a scene side by side, generates the sense of depth just like the human eyes. For the new interfaces the MobileRanger C3D camera embedded in the robotic platform Seekur Jr was used.

At first, only the image from the left camera was projected on the LCD (Figure 23). Later, both images were projected on the virtual reality headset Oculus Rift (Figure 24) for the operator.

4.3.2 Control Device

In this case, while developing the car-driving metaphor only one control configuration was defined for the Geomagic Touch. This configuration can be seen in Figure 25, which shows the commands associated to the axes.

4.3.3 Force Rendering

The force rendering process for the interfaces using the Phantom is based on the one implemented by (LEE et al., 2005) and it also considers user's action to directly determine the movement parameters for the robot. When the user determines joystick probe



Figure 23 – Monocular image obtained from one of the cameras.

position, the force that will be applied is calculated based on the position information of obstacles surrounding the robot.

Information about the distance and angle of detected objects were obtained from the laser range finder. This information was then used to compute the forces to be applied in each direction x and y .

The calculated force, which was inspired by (LEE et al., 2005) implementation and follow their idea, prevents the robot from moving and turning toward obstacles by providing information about its distance to the robot in the form of force. Figure 26 shows areas that are considered relevant according to the probe position. For each direction (x and y), a force is calculated for each obstacle detected in the relevant area and the maximum force is applied.

When the probe position is represented by (x, y) , the force applied (F_x, F_y) will be given by¹:

$$F_x = \begin{cases} -k_1 f_{+x}(d)x & \text{if } x \geq 0 \\ k_1 f_{-x}(d)x & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad F_y = \begin{cases} -k_2 f_{-y}(d)y & \text{if } y \geq 0 \\ k_2 f_{+y}(d)y & \text{if } y < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

where

$$\begin{aligned} f_{\pm x} &= \max_{i=1}^n [\phi_{\pm x}(d_i) \frac{d_i - r_{max}}{r_{max}} \cos \theta'_i] \\ f_{\pm y} &= \max_{i=1}^n [\phi_{\pm y}(d_i) \frac{d_i - r_{max}}{r_{max}} \sin \theta'_i] \\ \theta'_i &= \begin{cases} \theta_i & \text{if } |\theta_i| < 90^\circ \\ |\theta_i| - 90^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.7)$$

¹ Equations 4.6, 4.7 and 4.8 were also adapted from the ones presented by (LEE et al., 2005).



(a) Stereo images that were projected on the Oculus Rift.



(b) The Oculus Rift received the stereo images from the camera.

Figure 24 – Stereo images provided to the operator while using one of the teleoperation interfaces.

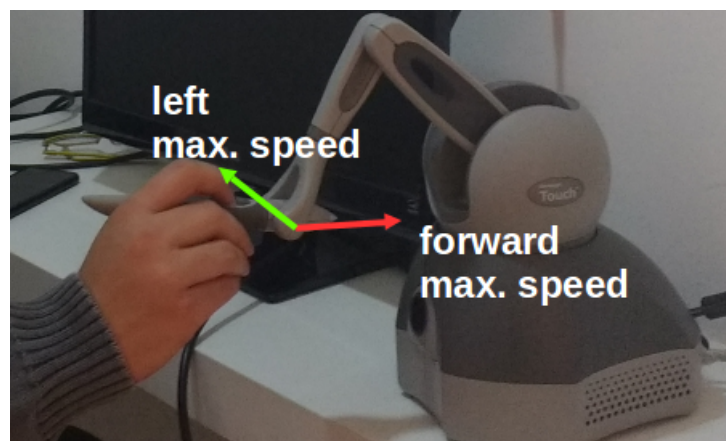


Figure 25 – Command configuration for the Phantom haptic device used to control the mobile platform.

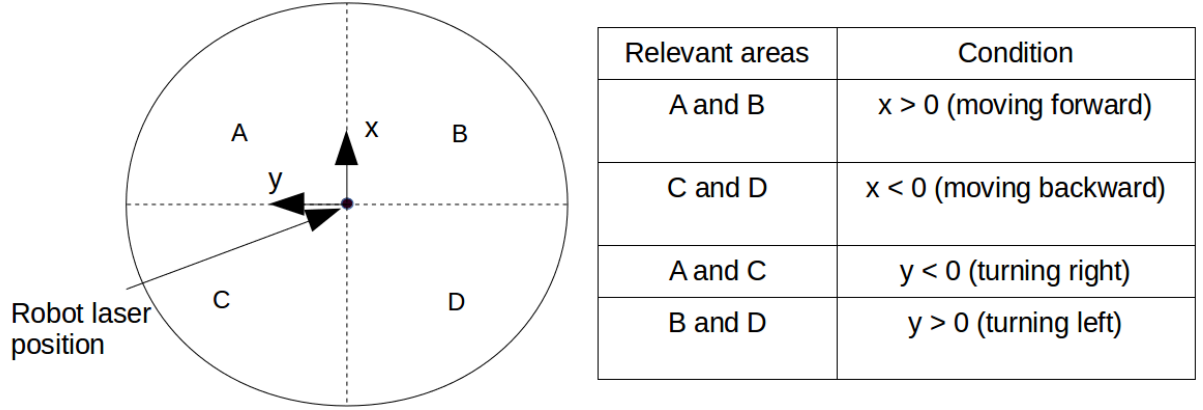


Figure 26 – Relevant areas considered according to the desired robot movement. Adapted from (LEE et al., 2005).

$$\begin{aligned}
 \phi_{-x}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } d_i < r_{max} \text{ and } \cos\theta_i < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \phi_{+x}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } d_i < r_{max} \text{ and } \cos\theta_i > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \phi_{-y}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } d_i < r_{max} \text{ and } \sin\theta_i < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \phi_{+y}(d_i) &= \begin{cases} 1 & \text{if } d_i < r_{max} \text{ and } \sin\theta_i > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

d_i = distance between i th object point detected and the robot.

θ_i = angle of i th scanned object point.

r_{max} = maximum distance within which detected objects are considered obstacles and start emitting a force.

k_1 and k_2 are proportional constants and were determined empirically.

The functions $f_{\pm x}$ and $f_{\pm y}$ represent the maximum values of the x and y components for all forces due to all obstacles detected within the r_{max} radius. The f_{+x} force, for example, is used when user tries to move the robot forward but there is an obstacle in that direction. The other f functions are used under the same idea, for the backward, turning left and turning right directions.

4.3.4 Map

Additional information about the environment was also provided to operators through a map (Figure 27). This map was generated in real-time using the laser data and was projected on the LCD side by side with the monocular images. Furthermore, when using

force feedback, the map displayed information about whether there was or not a force being applied to the Phantom, that means whether or not the object was an obstacle in that specific direction of movement. The displayed readings are shown with a RGB color value, going from red to blue depending on the intensity of the applied force.

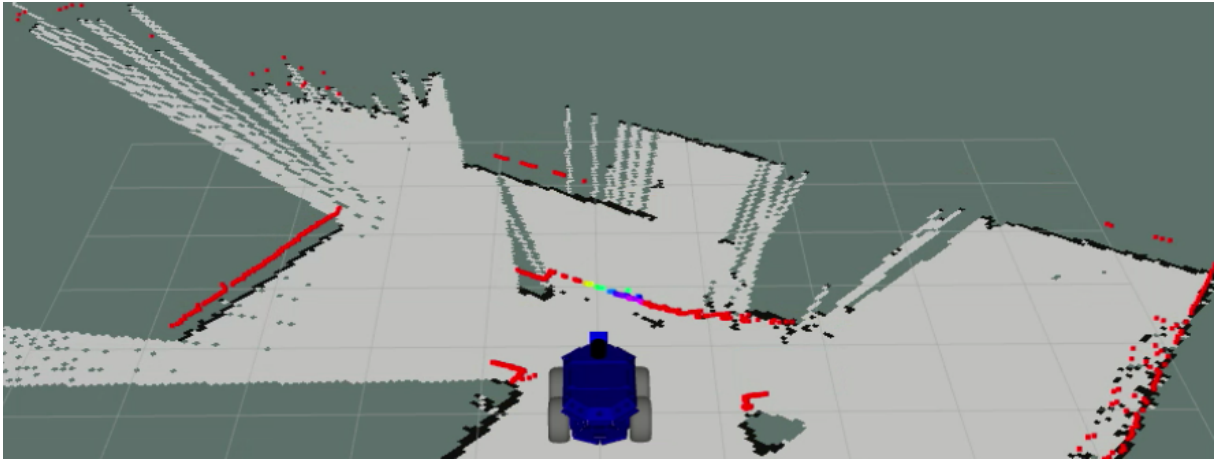


Figure 27 – Map of the environment that was displayed to the operator. Colors different from red indicate that a force feedback was being applied at the Phantom.

Chapter 5

Experiments Design

In order to evaluate the influence of interface characteristics and users profile on performance during teleoperation, two experiments were conducted. The first experiment, from now on named Test 1, was designed to analyze the effect of force feedback on teleoperation performance. In sequence, considering the results obtained from Test 1, the second experiment (Test 2) was designed aiming improvements on the interfaces and the analysis of user profile into more details.

The following sections describe some common aspects of both tests. Section 5.3 and 5.4 describe each one of the tests into more details.

5.1 Evaluation Methodology

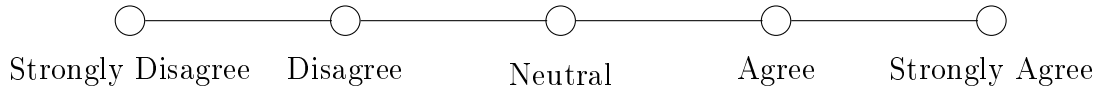
In both experiments, participants performed a task using different teleoperation interfaces. To evaluate the teleoperation interfaces used in the proof of concept tests, questionnaires were applied. After testing each one of interfaces, they answered the questionnaire to evaluate their satisfaction with the device and their sense of immersion.

Based on the experiment conducted by (KECHAVARZI; SABANOVIC; WEISMAN, 2012), the applied methodology focuses on how the user comfort with the controller and its characteristics increase the sense of immersion and affect performance, in terms of time and accuracy, besides users' general satisfaction with the teleoperation.

After performing each of the proposed tasks, participants were presented with a questionnaire to assess their satisfaction with the device and their sense of immersion. The methodology uses an adaptation of the PQ to measure the degree of presence observed by the participants. The original questionnaire was adapted to the current experiment and the final version was reduced to three scales: involvement, adaptation/immersion and interface quality. Questions in the final questionnaire became Likert-type items.

Likert-type items are widely used when a deeper knowledge about the interviewed in face of a presented statement is desired. Hence, after all tests, it is possible to analyze each item individually or in groups and, through appropriate statistical analysis, some information and conclusions can be obtained. One example would be the following statement: *"The explanation about the Likert scale was clarifying."*, together with the following

answer options:



Finally, an interview conducted at the end of the experiment with all participants was included in the evaluation. The purpose of this interview is to obtain the perception directly from the users, regarding the interface and the teleoperation experience. Later, this interview could also be used to draw subjects' profile with respect to their familiarity with haptic devices and the teleoperation of robots, which could indicate a more suitable operator profile. From the data obtained with the questionnaires and interviews, some statistical analyzes were conducted to evaluate the results obtained.

The adapted questionnaire used, as well as the final interview can be found in Appendices 8, 9 and 10¹.

5.2 Experimental Procedure

Upon arrival in the lab, participants were shown the robot they would control, but they were not allowed to test drive it or see the environment where the tests would take place. Each participant performed a task using the different interfaces being analyzed in each one of the two tests.

For each task, the execution time was recorded, as well as the number collisions with obstacles. The tasks was also given a percentage of completion based on the final parking status.

After using each of the interfaces, participants filled out the evaluation questionnaire, generating surveys for each participant. Finally, after performing the task with all interfaces, participants answered a final interview in which they were asked questions about the comfort and ease of use of the joystick and his perception in face of the use of force feedback and images to detect obstacles and perceive the environment.

5.3 Test 1

The first test performed aimed to evaluate the effects of using or not the force feedback on the performance during teleoperation. In this experiment, the teleoperation interfaces developed with the Novint Falcon haptic device were tested.

¹ They can also be found here: <https://github.com/aline-fidencio/presenceQuestionnaire>.

The main hypothesis tested in this experiment was:

Hypothesis 1 *The force feedback contributes for more significant results during the teleoperation of mobile robots, in terms of task execution time, number of collisions with obstacles and sense of immersion.*

Two teleoperation interfaces (Table 1) were evaluated in this experiment. These interfaces differ with regard to the use of the force feedback or not.

The development of two possible control configurations, as described in Section 4.2.3, generated the following hypothesis:

Hypothesis 2 *The configuration 2 of the joystick would provide results more significant in terms of task execution time, number of collisions with obstacles and sense of immersion.*

5.3.1 Participants

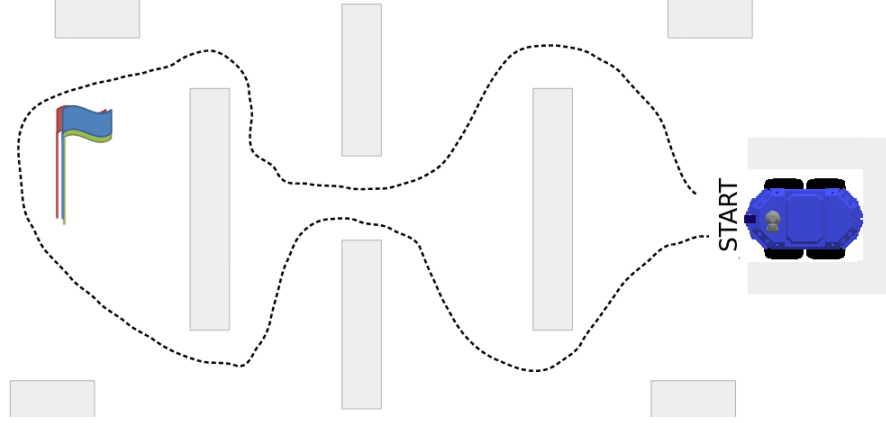
Participants for Test 1 were recruited based on their availability. In total, 16 participants among graduates, undergraduates and participants with basic school degree, average age 26, were recruited. These participants had different range of majors: 3 from the humanities (Business, Music), 10 from engineering and IT (Computer Science, Automation Eng., Mechanical Eng.) and 3 without college degree. Important to mention is that, even though this number can seem not significant, it was sufficient for the purpose of this test. Moreover, the time required to perform the test also imposed some limitations in the total number of participants, by making it more difficult to find available participants.

Considering the heterogeneous participants groups selected, while analyzing the variety of majors of study they possessed, the following hypothesis was raised:

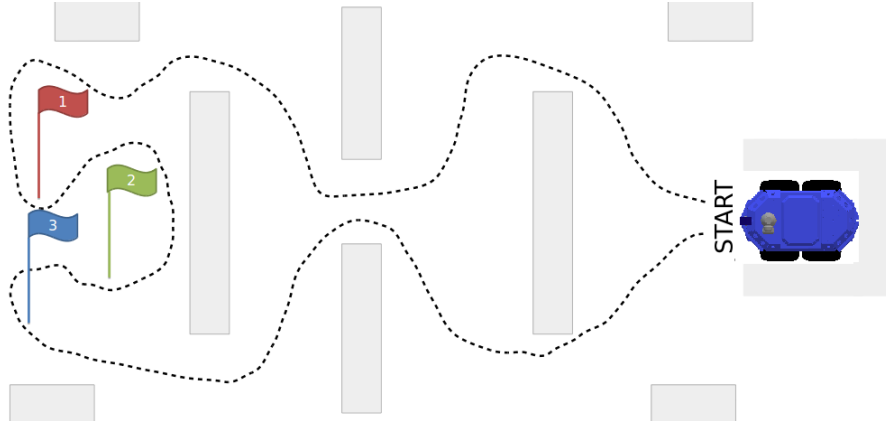
Hypothesis 3 *There exist a significant difference in performance according to the study subject of the participants in terms of task execution time, number of collisions with obstacles and sense of immersion.*

5.3.2 Tasks

In Test 1, each participant was requested to perform different tasks using the different teleoperation interfaces, as well as the different control configurations available for the haptic device. Schematic diagrams of the tasks performed are shown in Figure 28.



(a) Schematic diagram of the first task performed in Test 1.



(b) Schematic diagram of the second task performed in Test 1.

Figure 28 – Schematic diagram of the tasks performed in Test 1.

In the first task, the goal was to drive the robot along the path between the walls, then circle the set of cones and finally park the robot at its starting point. For the second task, the only difference is that the cones should be circled according to the color-numbering: 1-red, 2-green, 3-blue.

The first task was performed once with each configuration of the joystick without force feedback. In this case, the order in which the configurations were presented to participants was random. Shortly thereafter, the participant was asked to choose the preferred configuration. With the configuration chosen, the participant repeated the first task with force feedback applied to the Novint Falcon. Finally, the participant performed the second task using the chosen configuration, with and without force feedback, and, similarly, the order of utilization or not of the force feedback was defined randomly.

During the execution of the tasks, the execution time was recorded, as well as the number of collisions with obstacles. In addition, a task completion level associated with the parking at the end point has been established and this information has also been stored.

After completing each of the five tasks using the different command configurations for the Falcon, with and without force feedback, the participants answered an experiment evaluation questionnaire, producing five questionnaires per participant. Finally, after completing all the tasks, the participants answered a final interview in which questions regarding the comfort and ease of each of the configurations, the immersion level of the participant and their perception of the use of force feedback for obstacle detection were asked.

Figure 29 shows the environment in which the tests were performed, highlighting the physical separation between the operator and the teleoperated robotic platform ².

5.4 Test 2

Considering the results obtained in Test 1, improvements were made mainly in the implementation of the force feedback and Test 2 was conducted to evaluate three new teleoperation interfaces, as well as to deeper investigate users specific characteristics that could affect performance. In this experiment, the teleoperation interfaces developed using the Phantom Omni were tested.

The three teleoperation interfaces evaluated in this experiment are listed in Table 2. These interfaces differ with regard to the information given to operators in order to provide assistance during teleoperation.

The main hypothesis tested in this experiment was once again Hypothesis 1, together with:

Hypothesis 4 *The use of stereo images on virtual reality headsets contributes for more significant results during the teleoperation of mobile robots, in terms of task execution time, number of collisions with obstacles and sense of immersion.*

and

² A video of one of the tests performed can be found under <https://youtu.be/4HMjSov66mU>



(a) Environment of the operator (local environment).



(b) Environment of the mobile robotic platform (remote environment).

Figure 29 – Test environment in which Test 1 was performed.

Hypothesis 5 *Specific operators characteristics can affect performance during the teleoperation of mobile robots, in terms of task execution time, number of collisions with obstacles and sense of immersion.*

Additionally, the impact of the environment map was also observed.

5.4.1 Participants

For Test 2, 30 participants among graduates, undergraduates and participants with basic school degree, average age 27 were recruited. These participants majors were: 2 from the humanities (Business), 24 from engineering and IT (Computer Science, Automation Eng., Mechanical Eng.) and 4 without college degree.

Unlike Test 1, this test was projected to be performed in less time, in such a way that

it was also possible to find a greater number of available participants. The idea behind selecting more participants was to have a more significant sample size for post-test results analysis.

5.4.2 Taks

In Test 2, each participant was requested to perform a task using the different teleoperation interfaces. A schematic diagram of the task performed is shown in Figure 30.

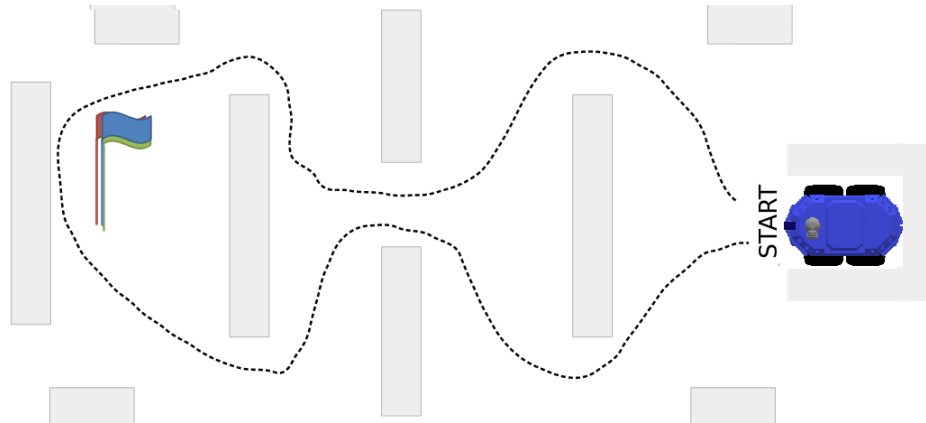


Figure 30 – Schematic diagram of the task performed in Test 2.

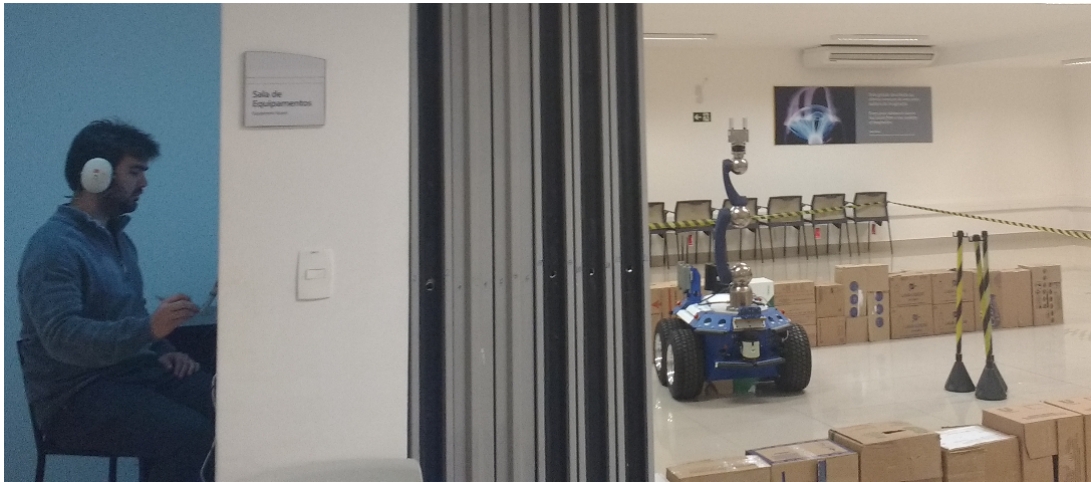


Figure 31 – Test environment in which Test 2 was performed.

The goal was to drive the robot along the path between the walls, then circle the set of cones and finally park the robot at its starting point.

The task was performed using each one of the interfaces developed using the Phantom Omni (listed in Table 2). First, the participant used the interface without force feedback (interface 1); then with the interface with the force feedback (interface 2) and finally with the interface using stereo images (interface 3), in this order.

During the execution of the task with each interface, the execution time was recorded, as well as the number of collisions with obstacles. In addition, a task completion level

associated with the parking at the end point has been established and this information has also been stored.

After completing the task using each one of the different interfaces with the Phantom, the participants answered an experiment evaluation questionnaire, producing three questionnaires per participant. Finally, after completing all the task with all interfaces, the participants answered a final interview in which questions regarding the comfort and ease of use of the haptic device, the immersion level of the participant and their perception of the use of force feedback for obstacle detection were asked.

Figure 31 shows the environment in which the tests were performed, highlighting the physical separation between the operator and the teleoperated robotic platform.

Chapter 6

Experiments Results and Discussions

This chapter describes the results obtained from the two experimental tests performed to evaluate and validate the teleoperation interfaces designed.

One-way and two-way between subjects ANOVA were conducted depending on the samples that were being analyzed for comparisons. All analysis for significance differences between conditions were made at the $p < .05$ level and the results are expressed in terms of the degrees of freedom (df), the F value (F) and the significance value (often referred as the p value): $(F_{df1,df2} = F, p)$, where df1 and df2 are the degrees of freedom between and within groups, respectively. For z-score tests, the z-score value is expressed with the respective significance value.

6.1 Results - Test 1

The results obtained from Test 1 are described below according to the different aspects that were analyzed during the experiment.

6.1.1 Task and Execution Time

According to the ANOVA test, there is no statistically significant difference between the task execution time using the configuration 1 or 2 ($F_{1,71} = .55, p = .46$). Still, the direction comparison (see Table 3) shows that, in general, configuration 2 showed better results.

Table 3 – Average task execution time (mm:ss) and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects (n = 16).

Config.	without force	with force	overall
1	M = 05:10; SD = 01:56	M = 07:08; SD = 07:08	M = 04:40; SD = 01:39
2	M = 04:28; SD = 04:09	M = 04:09; SD = 04:05	M = 04:25; SD = 01:08

While analyzing the two interfaces of interest (with and without force feedback), results show that there is a significant difference ($F_{1,72} = 4.65, p = .04$). This result shows that the force feedback increased performance in terms of task completion time by providing additional information about the presence of obstacles in the surroundings of the robot, which confirms Hypothesis 1.

6.1.2 Task Completion and Accuracy

Participants performance was also evaluated based on the observation of the robot's actions and percentage of task completion. The percentage of completion and the number of obstacles hit are presented on Table 4 and 5, respectively. The completion was based on the parking and it required that robot was driven into its initial parking place.

Table 4 – Percentage of task completion (%).

Interface 1	Interface 2
70.83	59.38

No significant difference was found while comparing task completion while using interfaces 1 or 2 ($Z = 1.06, p = .14$). The direct comparison shows that interface 2 promoted a worse performance than interface 1, which can be explained by the fact that the % of conclusion was measured in terms of how well was the robot parked and this included driving against a wall. As many users pointed out, the force feedback gave them the feeling of already being close enough to the wall, therefore, making them finish the task before finishing parking or, in other words, not moving the robot closer to the wall because they could feel the wall was too close.

Considering the number of obstacles hit, there is a significant difference ($F_{1,77} = 10.31, p < .005$) while comparing the number of obstacles hit using the interfaces 1 or 2, wherein with the interface 2, in average, less obstacles were hit ($M = 1.47; SD = 1.31$ vs $M = 2.83; SD = 2.09$). This result also confirms the hypothesis that force feedback effectively contributed to task completion by providing additional information about obstacles.

Table 5 – Average number of obstacles and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects ($n = 16$).

Interface 1	Interface 2
M = 1.47; SD = 1.31	M = 2.83; SD = 2.09

Once again, there is no evidence that one configuration provides better performance than the other in terms of number of hit obstacles, which also tell us that Hypothesis 2 should be rejected.

6.1.3 Sense of Immersion

There is also no evidence that one configuration of the joystick provides better performance than the other in terms of sense of immersion.

No significant difference was also found while comparing interfaces 1 and 2 ($F_{1,15} = .34, p = .57$). This indicates that, even though the interface with the force feedback

provided better overall results, there is room for improvement. The results also show evidence that there is a difference in performance between participants, which provides the motivation to analyze the effect of users profile on teleoperation performance.

6.1.4 Final Interview

The final interview showed that the participants were satisfied with the teleoperation, but improvements can be made. They were asked to describe the experience using three words, generating 35 different words. These words were grouped into positive (e.g., interesting, contagious, thought-provoking), negative (e.g., painful, unstable, inability) and others (e.g., new, usual, I). The majority, 45.71%, rated positively, 14.29% negatively and 40% were words that were not fit in the previous sets.

The Falcon configurations were evaluated according to three criteria: intuitiveness, ease of use and confidence of use and participants were asked to select between the two configurations according to each criteria. Results show that there was no consensus with respect to the configurations. However, this result suggests that allowing the control device to be parameterizable to each operator can be useful since it covers different expectations.

In the final interview, participants perception in face of the force feedback could be obtained. Results are listed in the Table 6.

The scores show that not only the force feedback effectively contributed to a more successful task completion, but also the participants themselves noticed its benefits.

Table 6 – Average agreement with the statements (1 = strongly disagree; 5 = strongly agree, $n = 16$).

Statement	Score
“The force feedback increased my perception of obstacles.”	4.31
“It was easier to perform the task without force feedback.”	2.81
“It was easier to perform the task with force feedback.”	3.69

This final interview also provided some information about the participants profile and it could also be used to analyze if some specific characteristics of the operator could also have an effect on the sense of immersion and performance, which might indicate a more suitable profile for operators.

While comparing the performance of participants in terms of task execution time, no significance difference was found while considering the different subjects of study ($F_{2,72} = 1.51, p = .23$), which gives evidences that Hypothesis 3 should be rejected. However, theses

results leave space for a deeper investigation about which user's profile characteristics could have any effect on his performance.

6.2 Results - Test 2

Results from Test 2 are described below according to the different aspects analyzed.

6.2.1 Task and Execution Time

Table 7 lists the task execution time for each interface used.

Table 7 – Average task execution time (mm:ss) and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects (n = 30).

Interface	Execution time
1	M = 06:28; SD = 03:01
2	M = 04:53; SD = 01:57
3	M = 05:39; SD = 02:38

According to the ANOVA test, there is a statistically significant difference between the task execution time using the different interfaces ($F_{2,56} = 6.18, p < .005$). The post-hoc pairwise analysis showed that there is a statistically significant difference between completion time using interfaces 1 and 2 ($F_{1,28} = 12.45, p < .005$) but there no statistically significant difference while comparing interfaces 2 and 3 ($F_{1,28} = 3.77, p = .06$).

The direct comparison shows that performance was worse while using interface 3 (15.6% greater with respect to interface 2 time). Main participants complain was that they found it difficult to adapt to the Oculus Rift. Nevertheless, interface 3 produced a lower execution time than interface 1 (14.4% smaller with respect to interface 3 time), what highlights the advantages of using force feedback and stereo vision to provide additional information about the environment.

These results confirm Hypothesis 1 that the force feedback contributes to task completion by providing additional information about the environment. However, it refuses Hypothesis 4 that the use of stereo vision images would also contribute to more significant results and indicates that in order to better make use of the advantages of stereo vision images, improvements have to be made on this interface.

6.2.2 Task Completion and Accuracy

The percentage of completion and the number of obstacles hit are presented on Table 8 e 9, respectively.

Table 8 – Percentage of task completion (%).

Interface 1	Interface 2	Interface 3
35.5	48.4	9.7

No significant difference was found while comparing task completion while using interfaces 1 or 2 ($Z = -1.03, p = .15$). However, the direct comparison shows that interface 2 (48.4%) promoted a better performance than interface 1 (35.5%).

There is a significant difference in task completion level for interface 2 *vs* 3 ($Z = 3.36, p < .0005$). The low completion levels can be explained by the fact that the camera images gave the participants the feeling that the objects were closer, as they reported. As the completion was based on the parking and it required that robot was driven against a wall, the participants had the feeling that the robot was already close enough. This also suggests that the chosen task completion metric may also not be very appropriate and a better choice can be found.

Considering the number of obstacles hit, there is a significant difference ($F_{1,28} = 7.50, p = .01$) while comparing the number of obstacles hit using the interfaces 1 or 2, wherein with the interface 2, in average, less obstacles were hit ($M = 1.43; SD = 1.56$ *vs* $M = 2.28; SD = 1.91$). This result also confirms the hypothesis that force feedback effectively contributes to task completion and accuracy by providing additional information about obstacles.

There was also a significant difference while comparing the interfaces 2 and 3 ($F_{1,28} = 45.53, p < .0001$). In this case, however, while using interface 3 more obstacles were hit. Participants related that with the stereo images, they lost the notion of the robot's dimensions, especially on the side, which made them hit more obstacles.

Table 9 – Average number of obstacles and standard deviation (SD) for all interfaces, for all subjects ($n = 30$).

Interface 1	Interface 2	Interface 3
M = 2.28; SD = 1.91	M = 1.43; SD = 1.56	M = 4.33; SD = 2.12

6.2.3 Sense of Immersion

The total score obtained from the PQ is shown at Table 10. Statistically significant differences were found while comparing the three different interfaces used in terms of sense of immersion observed by participants ($F_{2,56} = 6.70, p < .005$). Moreover, the pairwise analysis shows that there the sense of immersion differs significantly between interfaces 1 and 2 ($F_{1,29} = 11.25, p < .005$) and interfaces 2 and 3 ($F_{1,29} = 9.23, p < .005$).

Deeper analyzes also show that there are differences in terms of %Involvement and %Adaptation/Immersion provided by each interface, but no difference in terms of %Interface Quality. There is also evidence that the overall immersion observed differs significantly between participants.

A closer look to interface 3 performance suggests that improvements can be done at this interface to increase its performance. Many participants mentioned that they observed a significant delay in the images. This delay affected their perception of the environment and task execution. Moreover, they also pointed out that they got a little dizzy while using the Oculus Rift. These results suggest that an improvement is required in terms of reducing delay and improving image projection quality on the headset.

Table 10 – Presence Questionnaire scores.

	Interface 1	Interface 2	Interface 3
%Total Score	66.79	71.54	61.50
%Involvement	69.25	74.92	63.08
%Adapt./Immersion	69.41	72.86	64.52
%Interface Quality	52.50	57.22	47.17

Nonetheless, it is worth it to mention that the overall sense of immersion (66.6%) suggests that participants were somehow involved in the tasks they were performing. Still, improvements can be made in the interfaces to produce better results. Many participants reported that they observed a delay in the camera images, what made it difficult to perform the task and to identify the environment. Moreover, being the joystick and the teleoperation experience new to many of the participants, the anxiety in face of this new system may also have been a distracting factor.

6.2.4 Final Interview

The final interview showed that the participants were satisfied with the teleoperation. They were asked to describe the experience using three words, generating 41 different words. These words were grouped into positive (e.g., interesting, contagious, thought-provoking), negative (e.g., painful, unstable, inability) and others (e.g., I, experience, future). The majority, 75%, rated positively, 6.8% negatively and 18.2% were words that were not be fit in the previous sets.

The Phantom was evaluated (1 - bad; 5 - excellent) according to three criteria: intuitiveness (3.7), ease of use (3.3) and confidence of use (3.3). Ideally, a higher evaluation was expected and the fact that the participants are not comfortable with the device shows that it might have had a negative influence on the performance. In addition, it suggests that the selection of control devices to be used directly affects performance and

its suitability to operators must be taken into account. Moreover, allowing the operator to familiarize himself with the device before performing the tasks can also be beneficial.

This final interview also provided some information about the participants profile and it could also be used to identify if some specific characteristics of the operator could also have an effect on the sense of immersion and performance, which might indicate a more suitable profile for operators. As described below, these results provide evidences that confirm partially Hypothesis 5.

While comparing the performance of participants who had ever teleoperated a robot before against those who had not, a significant difference was found on task execution time ($F_{1,44} = 28.10, p < .0001$). But no significant difference was found in the number of obstacles hit ($F_{1,44} = 1.70, p = .20$) or the percentage of task completion ($Z = -1.58, p = .06$). However, the direct comparison of averages show that the number of obstacles hit is smaller ($M = 2.49; SD = 1.88$ *vs* $M = 3.02; SD = 2.68$) and the completion level is greater (40% *vs* 24.44%) for those who had had previous experience with teleoperation of robots.

Considering participants with and without driver's license, significant differences were also found for execution time ($F_{1,87} = 12.79, p < .005$). The direct comparison shows that those with driver's license ($M = 05 : 24; SD = 02 : 11$) had a lower execution time than those without it ($M = 07 : 41; SD = 04 : 39$). No statistically significant differences were found in terms of number of obstacles hit ($F_{1,88} = .002, p = .96$), task completion level ($Z = -.21, p = .42$) or immersion level ($F_{1,93} = .45, p = .51$).

The amount of hours spent with video games also did not present any effect on immersion level analyzed via the PQ ($F_{2,58} = .92, p = .40$). However, it did show evidence that participants who spent about 4-6h per week with video games had better performance in terms of execution time ($F_{2,83} = 4.63, p < .05$) and task completion ($Z = -2.61, p < .005$).

In the final interview, participants perception in face of the force feedback and the use of monocular or stereo images could be obtained. Moreover, their impressions about the map usage for obtaining more information about the environment was also queried. Results are listed in the Table 11.

The scores show that not only the force feedback effectively contributed to a more successful task completion, but also the participants themselves notices its benefits. Previous listed results show that interface 3 had a lower performance and the user interview demonstrates that they also noticed that this interface had less quality compared to the others and must, therefore, be improved. Also, the benefits from using the map and the

monocular images were evident to participants.

Table 11 – Average agreement with the statements (1 = strongly disagree; 5 = strongly agree, $n = 30$).

Statement	Score
“The force feedback increased my perception of obstacles.”	3.9
“It was easier to perform the task without force feedback.”	2.6
“It was easier to perform the task with force feedback.”	4.1
“The force map increased my perception of obstacles.”	3.8
“It was easier to perform the task with mono vision.”	4.0
“It was easier to perform the task with stereo vision.”	2.6

6.3 Discussion

Considering the results obtained from Tests 1 (Section 6.1) and 2 (Section 6.2), a new question raised: is it possible to say that either the Novint Falcon or the Phantom Omni could be considered a better haptic device for teleoperation?

In terms of sense of immersion and obstacles hit, no statistically significant was found. However, with respect to task completion time and % of conclusion, the Falcon presented better results when the interface did not use the force feedback. For the interfaces using force feedback, no difference was found between the Falcon and Phantom device.

Taking a closer look to performance index for each device, in general the Falcon always presented better results. This observation is in accordance to the perception from those who participated in both tests and thought that the Falcon was easier to handle and made it easier to complete the tasks. In that sense, we could conclude that for the purpose of the tasks proposed in this study, the Novint Falcon could be considered a more suitable teleoperation device. However, deeper investigation is needed to promote stronger results.

Chapter 7

Final Considerations

Below the main conclusions drawn from the experimental results are summarized, followed by some further considerations and suggestions for future work.

7.1 Conclusions

In order to minimize the risks to which operators are exposed in different activities and increase productivity, several companies seek the use of automated systems. Proposed solutions point to the use of teleoperation techniques, since, in many cases, an operator's intervention, even if minimal, is still required. This scenario promotes the study of teleoperation techniques, as well as the application of teleoperated robotic systems.

With the use of teleoperation, it is not only possible to reduce the risks to which the operator is exposed to during his activities, but also improve performance during equipment operation. However, during teleoperation interfaces implementation, it is equally relevant to validate them in the point of view of future users in terms of usefulness of provided information and overall satisfaction with the teleoperation.

Thereby, the work developed presents the analyzes of some aspects that can influence performance during teleoperation on a proof of concept test. For that, different teleoperation interfaces were evaluated during two experiments conducted in a controlled environment in laboratory and even though these are preliminary results, some important factors could be observed.

Results show that interfaces using force feedback can significantly contribute to task completion, enhancing task execution time, reducing obstacles hit and improving overall sense of immersion, while providing additional information about the surroundings of the equipment. Moreover, additional visual information, such as the environment map, can also increase perception of obstacles.

Even though monocular images do not provide sense of depth, displaying images from the environment to the user also improves his perception of the remote environment. However, the usage of stereo images with the Oculus Rift did not present results as expected. Still, some participants also pointed out that they can see the potential of its use since it can provide the sense of depth, once again highlighting that improvements can

be made to increase this interface performance. Yet, this result is still considered positive since it was the first test with this prototype.

Last, there are evidences that users with previous teleoperation experience, that have driver's license or spend time with video games present better overall performance, in terms of task execution time and accuracy. While this results suggest that it might be interesting to select operators based on some existent characteristics, they also show that it is important to keep contact with technology in order to provide a broader group with the ability to teleoperate robots. Moreover, it highlights that for future tests a training period can be beneficial.

Considering that, it is distinguishable that a proper teleoperation interface design can significantly affect performance during teleoperation. Therefore, in order to develop more robust teleoperation interfaces, such aspect should be considered.

7.2 Contributions

Some contributions of this work are listed below:

- Integration of components into ROS preparing a testing platform for future research using the Seekur Jr;
- Definition of an evaluation methodology for teleoperation interfaces that can be used to evaluate interfaces developed for real mining equipment in field tests;
- Establishment of a testing environment that can be improved and turned into a proof of concept framework for teleoperation interfaces for mining equipment, as well as for training users for any robotic teleoperation.

7.3 Future Work

As these were initial prototype experiments, even though results are positive, there are still many improvements to be made. Hence, future work includes:

- Perform experiment with a more strictly selected group of participants;
- Use tasks with different difficulty levels;
- Improve visual information quality;
- Allow participants to control robot platform before real test;
- Address also the problem of communication delay;
- Consider more types of information for feedback;

- Define a new metric for task conclusion analysis.

Last but not least, aiming application within the industry, more specifically mining industry, we wish to develop a teleoperation interface that can be used in mining equipment, used in engineering, exploration or extraction. The final goal is to use the Seekur Jr robot operating similar to an excavator (Figure 32) in order to perform some proof-of-concept tests. For that, a robotic manipulator 6 DOF Schunk Powerball will be controlled by another haptic device that will receive a force feedback based on readings from the torque and force sensor attached to manipulator's end effector.

It is worth it to mention that for a real scenario the use of such interface will have different needs and which will have to be considered during experiment planning and execution.

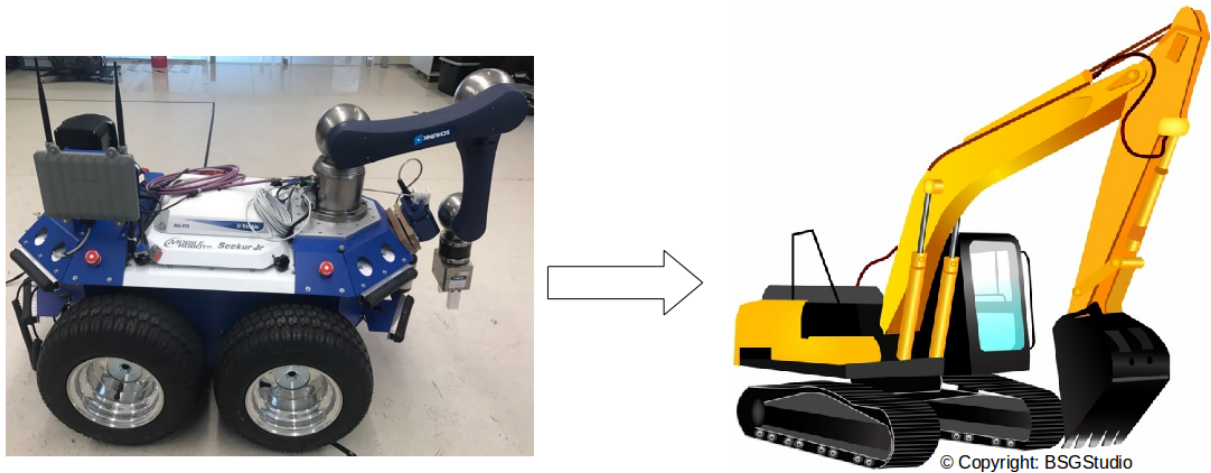


Figure 32 – Future application: Seekur Jr operating as an excavator.

7.4 Publications

The results achieved during this research were accepted for presentation in the following events:

1. IROS 2017 - International Conference on Intelligent Robots and Systems, 24-28 Sep., Vancouver - Canada.
2. SBAI 2017 - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 01-04 Oct, Porto Alegre - Brazil.
3. ABM Week 2017 - 18º Simpósio de Mineração 02-04 Oct, São Paulo - Brazil.

The papers presented in those events can be found in Appendices 11, 12 and 13.

Bibliography

- BALTA, H. et al. Integrated mobile robot system for landmine detection. **HUDEM2014**, 2014.
- BARKER, E. **Mining industry looks towards a new wave of automation.** 2017. <<http://www.abc.net.au/news/rural/2017-05-23/the-future-of-automation-in-the-mining-industry/8550636>>.
- BIBBY, J.; NECESSARY, R. **Robonaut 1**. 2008. <<https://robonaut.jsc.nasa.gov/R1/>>. Accessed 07/12/2016.
- BONCHIS, A. et al. Robotic explosive charging in mining and construction applications. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 11, n. 1, p. 245–250, Jan 2014. ISSN 1545-5955.
- COOK, G. Kinematic models for mobile robots. In: _____. **Mobile Robots**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2011. p. 1–10. ISBN 9781118026403.
- CORKE, P. et al. Mining robotics. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1127–1150.
- DAVIES, R. A.; MASKERY, J. S.; JOHN, N. W. Chemical education using feelable molecules. In: **Proc. of the 14th Int. Conf. on 3D Web Technology**. [S.l.]: ACM, 2009. p. 7–14. ISBN 978-1-60558-432-4.
- DESBATS, P. et al. Force feedback teleoperation of an industrial robot in a nuclear spent fuel reprocessing plant. **Industrial Robot: the international journal of robotics research and application**, v. 33, n. 3, p. 178–186, 2006.
- DIGITAL Transformation Initiative: Mining and Metals Industry. World Economic Forum, 2017.
- DIOLAITI, N.; MELCHIORRI, C. Teleoperation of a mobile robot through haptic feedback. In: IEEE. **Haptic Virtual Environments and Their Applications, IEEE International Workshop 2002 HAVE**. [S.l.], 2002. p. 67–72.
- DUDEK, G.; JENKIN, M. **Computational Principles of Mobile Robotics**. Cambridge University Press, 2010. (Computational Principles of Mobile Robotics). ISBN 9780521692120. Disponível em: <<https://books.google.de/books?id=db5pr2275i0C>>.
- ERICKSON, D. et al. Multi-arm multilateral haptics-based immersive tele-robotic system (hits) for improvised explosive device disposal. In: . [S.l.: s.n.], 2014. v. 9084, p. 9084 – 9084 – 12.
- ERIKSSON, G. Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a swedish mine. In: **Proc. of 1st Int. Symp. on Mine Mechanization and Automation**. [S.l.: s.n.], 1991. v. 2, p. 15–33.
- FERNANDEZ, E. et al. **Learning ROS for robotics programming**. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2015.
- FOUNDATION, O. S. R. **About ROS**. 2018. <<http://www.ros.org/about-ros/>>. Accessed 09/03/2018.

- FOUNDATION, O. S. R. **Core Components**. 2018. <<http://www.ros.org/core-components/>>. Accessed 09/03/2018.
- FUKUI, R. et al. Imitation-based control of automated ore excavator: improvement of autonomous excavation database quality using clustering and association analysis processes. **Advanced Robotics**, v. 31, n. 11, p. 595–606, 2017.
- GARCÍA, J. C. et al. A natural interface for remote operation of underwater robots. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 37, n. 1, p. 34–43, Jan 2017. ISSN 0272-1716.
- GEOMAGIC Touch. 2017. <https://www.researchgate.net/figure/270897457_fig5_Figure-5-Geomagic-Touch>. Accessed 10/12/2017.
- GOERTZ, R. Fundamentals of general-purpose remote manipulators. **Nucleonics (U.S.) Ceased publication**, v. 10, n. 11, p. 36–42, Nov 1952.
- GOERTZ, R. Mechanical master-slave manipulator. **Nucleonics (U.S.) Ceased publication**, v. 10, n. 11, p. 45–46, Nov 1954.
- GOERTZ, R.; BEVILACQUA, F. A force-reflecting positional servomechanism. **Nucleonics (U.S.) Ceased publication**, v. 10, n. 11, p. 43–45, 1952.
- GRAVETTER, F. J.; WALLNAU, L. B. **Statistics for the behavioral sciences**. [S.l.]: Cengage Learning, 2016.
- GUSTAFSON, A. **Dependability assurance for automatic load haul dump machines**. Tese (Doutorado) — Luleå tekniska universitet, 2011.
- GUSTAFSON, A. et al. Impact of technical and operational factors on effectiveness of automatic load-haul-dump machines. **Mining Technology**, v. 126, n. 4, p. 185–190, 2017.
- HANNAFORD, B.; OKAMURA, A. M. Haptics. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 719–739.
- JAMES, E. **2-D Circle-Rectangle Collision Detection**. 2008. <<https://stackoverflow.com/questions/401847/circle-rectangle-collision-detection-intersection>>. Accessed 20/02/2017.
- JIA, Y.; XI, N.; BUETHER, J. Design of single-operator-multi-robot teleoperation systems with random communication delay. In: **2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 171–176. ISSN 2153-0858.
- KECHAVARZI, B. D.; SABANOVIC, S.; WEISMAN, K. Evaluation of control factors affecting the operator's immersion and performance in robotic teleoperation. In: **2012 IEEE RO-MAN**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 608–613. ISSN 1944-9445.
- KIM, S.; JUNG, S. H.; KIM, C. H. Preventive maintenance and remote inspection of nuclear power plants using tele-robotics. In: **Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)**. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 603–608 vol.1.

LE, Q. H.; LEE, J. W.; YANG, S. Y. Remote control of excavator using head tracking and flexible monitoring method. **Automation in Construction**, v. 81, p. 99 – 111, 2017. ISSN 0926-5805.

LEE, M. et al. The wobbly table: Increased social presence via subtle incidental movement of a real-virtual table. In: **2016 IEEE Virtual Reality (VR)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 11–17.

LEE, S. et al. Haptic teleoperation of a mobile robot: A user study. **Presence**, v. 14, n. 3, p. 345–365, June 2005. ISSN 1054-7460.

LINDA, O.; MANIC, M. Self-organizing fuzzy haptic teleoperation of mobile robot using sparse sonar data. **IEEE transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 58, n. 8, p. 3187–3195, 2011.

LOOS, H. M. Van der; REINKENSMEYER, D. J. Rehabilitation and health care robotics. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1223–1251.

LU, Z.; HUANG, P.; LIU, Z. Predictive approach for sensorless bimanual teleoperation under random time delays with adaptive fuzzy control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, PP, n. 99, p. 1–1, 2017. ISSN 0278-0046.

LUM, J. S. **Utilizing Robot Operating System (ROS) in robot vision and control**. Dissertação (Mestrado) — Naval Postgraduate School, California, 2015.

MACHULIE, K. **libnifalcon: Open source driver for the Novint Falcon**. 2009. <<http://qdot.github.io/libnifalcon/>>. Accessed 08/12/2016.

MARTIN, S. 2012. <<https://code.launchpad.net/~cyphylab/cyphy/bonsai>>. Accessed 11/12/2016.

MARTIN, S.; HILLIER, N. Characterisation of the novint falcon haptic device for application as a robot manipulator. In: CITESEER. **Australasian Conf. on Robotics and Automation (ACRA)**. [S.l.], 2009. p. 291–292.

MARTURI, N. et al. Towards advanced robotic manipulation for nuclear decommissioning: A pilot study on tele-operation and autonomy. In: **2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8.

MITSOU, N. C.; VELANAS, S. V.; TZAFESTAS, C. S. Visuo-haptic interface for teleoperation of mobile robot exploration tasks. In: IEEE. **Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2006. p. 157–163.

MOON, S. M. et al. Development of tele-operation control station for intelligent excavator. In: **2009 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 123–128. ISSN 2325-0526.

MOURÃO, J. **Vale usa robôs na construção de túneis do projeto S11D**. 2014. <<http://noticiasmineracao.mining.com/2014/11/03/vale-usa-robos-na-construcao-de-tuneis-do-projeto-s11d/>>.

- MUHAMMAD, A. et al. Development of water hydraulic remote handling system for diverter maintenance of iter. In: **2007 IEEE 22nd Symposium on Fusion Engineering**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–4. ISSN 1078-8891.
- MURPHY, R. R. Trial by fire [rescue robots]. **IEEE Robot. Automa. Mag.**, v. 11, n. 3, p. 50–61, Sept 2004. ISSN 1070-9932.
- MURPHY, R. R. et al. Search and rescue robotics. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1151–1173.
- NADRAG, P. et al. Remote control of an assistive robot using force feedback. In: **2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 211–216.
- NATORI, K. et al. Time-delay compensation by communication disturbance observer for bilateral teleoperation under time-varying delay. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 3, p. 1050–1062, March 2010. ISSN 0278-0046.
- NIEMEYER, G.; PREUSCHE, C.; HIRZINGER, G. Telerobotics. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 741–757.
- PARK, H.-S. et al. Implementation of a virtual autonomous excavator. **Transactions of FAMENA**, Fakultet strojarstva i brodogradnje, v. 41, n. 3, p. 65–80, 2017.
- PHANTOM Omni Haptic Device. 2016. <<http://www.dentsable.com/haptic-phantom-omni.htm>>. Accessed 08/12/2016.
- RENON, P. et al. Haptic interaction between human and virtual icub robot using novint falcon with chai3d and matlab. In: **Pro. of the 32nd Chinese Control Conf.** [S.l.: s.n.], 2013. p. 6045–6050.
- SALLNÄS, E.-L.; RASSMUS-GRÖHN, K.; SJÖSTRÖM, C. Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback. **ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.**, ACM, v. 7, n. 4, p. 461–476, dez. 2000. ISSN 1073-0516.
- SEEKUR Jr. 2016. <<http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/SeekurJr.aspx>>. Accessed 08/12/2016.
- SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. [S.l.: s.n.], 2011.
- SILVA, G. R. et al. A questionnaire for measuring presence in virtual environments: factor analysis of the presence questionnaire and adaptation into brazilian portuguese. **Virtual Reality**, v. 20, n. 4, p. 237–242, 2016. ISSN 1434-9957.
- SUBRAMANIAN, S. **How Automation in Mining is Changing the Industry**. 2017. <<https://www.rapidbizapps.com/automation-in-mining-changing-industry/>>.
- SUNG, G. T.; GILL, I. S. Robotic laparoscopic surgery: a comparison of the da vinci and zeus systems. **Urology**, Elsevier, v. 58, n. 6, p. 893–898, 2001.
- THE Novint Falcon Haptic System. 2017. <https://www.researchgate.net/figure/270897457_fig5_Figure-5-Geomagic-Touch>. Accessed 10/12/2017.

TZAFESTAS, S. G. **Introduction to mobile robot control**. [S.l.]: Elsevier, 2013.

VAGENAS, N. Application of remote-controlled/automatic load-haul-dump system in zinkgruvan, sweden. In: **Proc. 1st Int. Symp. on Mine Mechanization and Automation**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 6–21.

VANACKEN, L.; BOECK, J. D.; CONINX, K. The phantom versus the falcon: Force feedback magnitude effects on user's performance during target acquisition. In: _____. **Haptic and Audio Interaction Design: 5th Int. Workshop, HAID 2010, Copenhagen, Denmark, September 16-17, 2010. Proc.** [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 179–188. ISBN 978-3-642-15841-4.

WITMER, B. G.; SINGER, M. J. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. **Presence: Teleoperators and virtual environments**, MIT Press, v. 7, n. 3, p. 225–240, 1998.

WU, D. et al. A novel method for estimating the heading angle for underground load-haul-dump based on ultra wideband. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, v. 0, n. 0, p. 0142331217690218, 2017.

YOSHIDA, K.; WILCOX, B. Space robots and systems. In: _____. **Springer Handbook of Robotics**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1031–1063.

YUSOF, A. A. et al. Modern practical application and research on teleoperated excavators control, feedback and perception issues in post disaster recovery operation. In: **2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 179–185.

Chapter 8

Adapted Presence Questionnaire



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ASSOCIAÇÃO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO,
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE
MINERAÇÃO – PROFICAM



Questionário sobre o Experimento

Agradeço sua participação neste experimento. Por favor responda às questões abaixo com base no protótipo que você acabou de testar marcando um “x” no círculo apropriado na escala de 5 valores de acordo com o conteúdo da sentença e as legendas. Por favor considere toda a escala enquanto preparando suas respostas. Responda às questões de maneira independente, na ordem em que elas aparecem. Não pule nenhuma questão ou retorne a uma questão anterior para alterar sua resposta. Obrigada pelo seu tempo.

Projeto:

Desenvolvimento de um arcabouço para teleoperação de equipamentos na mineração

Data:

___/03/2017

Nome: _____

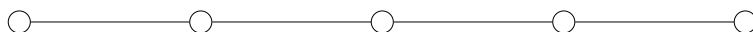
Idade: _____

Escolaridade: _____

Curso: _____

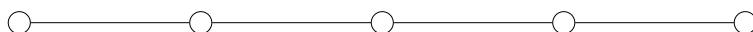
Contato: _____

1. Fui capaz de controlar os eventos.



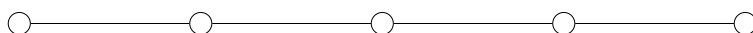
Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

2. O ambiente foi responsivo diante das ações que eu iniciei (ou realizei).



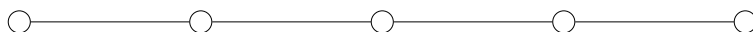
Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

3. As interações com o ambiente se mostraram naturais.



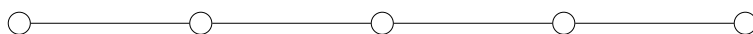
Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

4. Os aspectos visuais do ambiente me envolveram completamente.



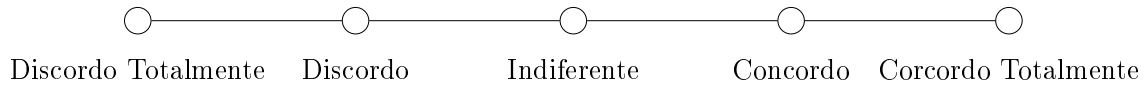
Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

5. O mecanismo utilizado para controlar a movimentação no ambiente foi natural.

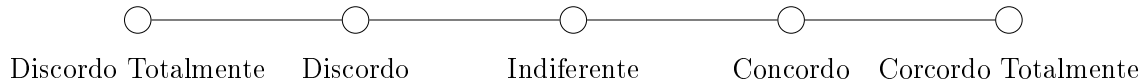


Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

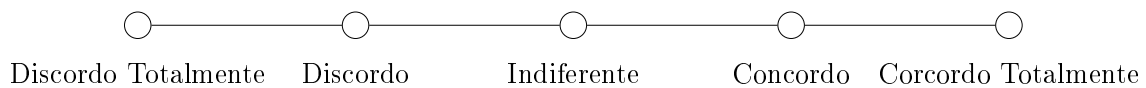
6. **Meu senso de objetos movendo-se através do espaço foi convincente.**



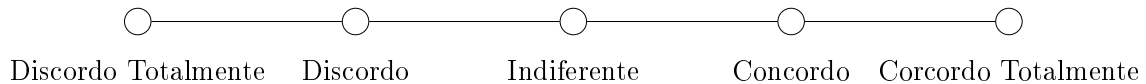
7. **As interações com o ambiente virtual foram completamente consistentes com minhas experiências no mundo real.**



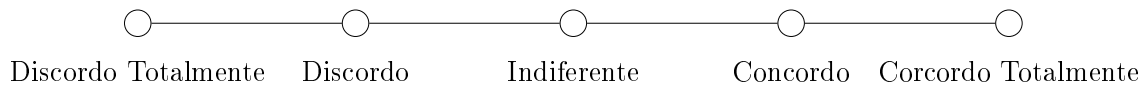
8. **Fui capaz de antecipar o que aconteceria como resposta às ações que eu realizei.**



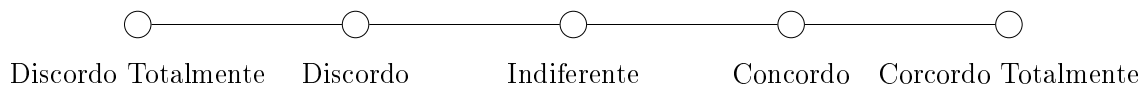
9. **Fui capaz de ativamente pesquisar ou buscar no ambiente usando tato.**



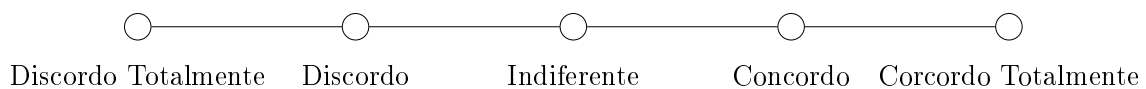
10. **Meu senso de movimentação no ambiente virtual foi completamente convincente.**



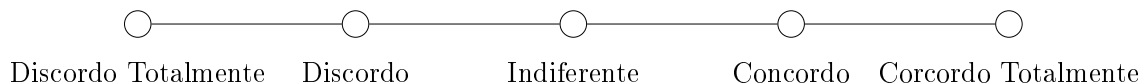
11. **Me envolvi completamente na experiência no mundo virtual.**



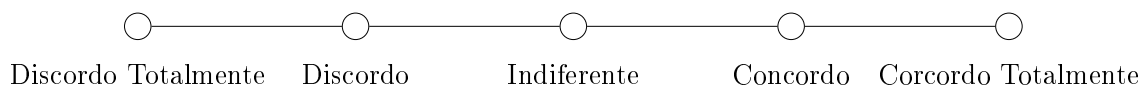
12. **Presenciei grande atraso entre minhas ações e o resultado desejado.**



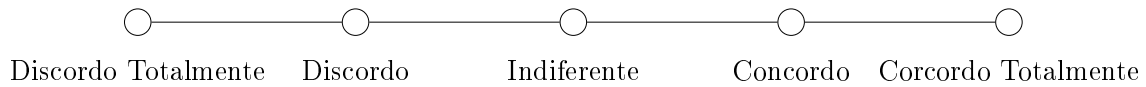
13. **Me ajustei rapidamente à experiência no ambiente virtual.**



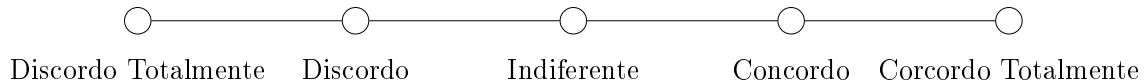
14. **Me senti proficiente em mover e interagir com o ambiente virtual no final da experiência.**



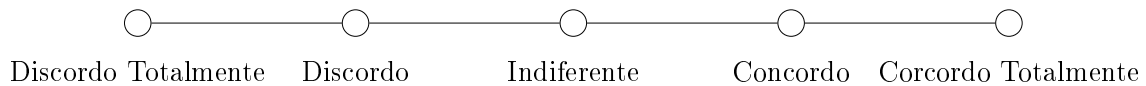
15. A qualidade das informações visuais interferiram ou me distraíram completamente de realizar as tarefas solicitadas.



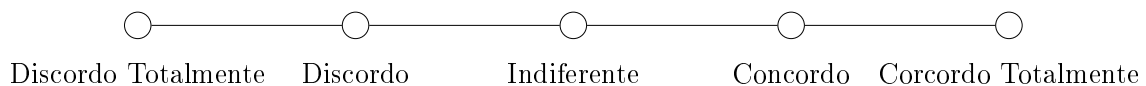
16. O dispositivo de controle interfereu completamente em meu desempenho na realização das tarefas solicitadas.



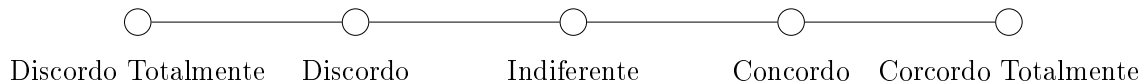
17. Me concentrei mais nas tarefas solicitadas do que nos mecanismos utilizados para a realização destas tarefas.



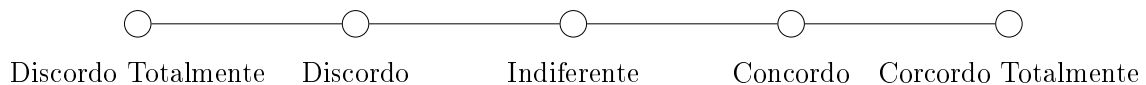
18. Existiram momentos durante a experiência com o ambiente virtual em que me senti completamente focado na tarefa ou no ambiente.



19. Me adaptei facilmente aos dispositivos de controle para interagir com o ambiente virtual.



20. As informações disponibilizadas através de diferentes sentidos (ex. visão, tato) foram consistentes.



Chapter 9

Final Interview Applied in Test 1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ASSOCIAÇÃO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO,
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE
MINERAÇÃO – PROFICAM



Entrevista Final

1. Descreva sua experiência em três palavras:

--	--	--

2. Selecione a configuração do Novint Falcon que, para você, melhor atendeu aos seguintes requisitos:

	Configuração 1	Configuração 2
Intuitividade	☐	☐
Facilidade de Utilização	☐	☐
Confidência no Uso	☐	☐

3. Como você avalia seus conhecimentos em informática?

☐ — ☐ — ☐ — ☐ — ☐

Iniciante Básico Intermediário Avançado Expert

4. Você já havia experimentado algum dispositivo com realimentação de força, tal como o Novint Falcon?

Sim Não

☐ ☐

5. Você já havia comandado um robô de forma teleoperada?

Sim Não

☐ ☐

6. A realimentação de força aumentou minha percepção sobre a presença de obstáculos.

☐ — ☐ — ☐ — ☐ — ☐

Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

7. Foi mais fácil completar as tarefas sem realimentação de força.

☐ — ☐ — ☐ — ☐ — ☐

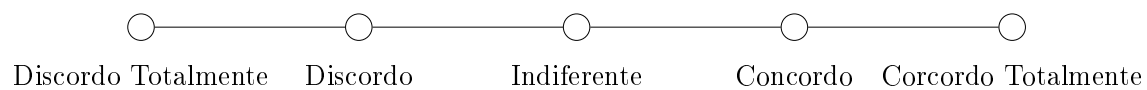
Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

8. Foi mais fácil completar as tarefas com realimentação de força.

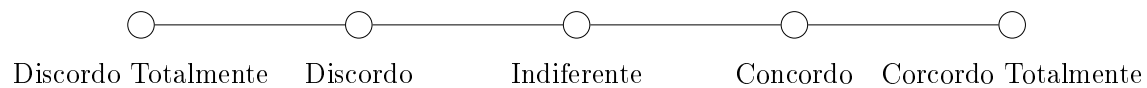
☐ — ☐ — ☐ — ☐ — ☐

Discordo Totalmente Discordo Indiferente Concordo Corcordo Totalmente

9. **Foi mais fácil completar as tarefas utilizando a Configuração 1 do Novint Falcon.**



10. **Foi mais fácil completar as tarefas utilizando a Configuração 2 do Novint Falcon.**



Chapter 10

Final Interview Applied in Test 2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ASSOCIAÇÃO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO,
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE
MINERAÇÃO – PROFICAM



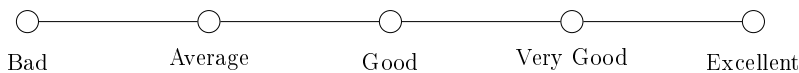
Final Interview

1. Describe your experience in three words:

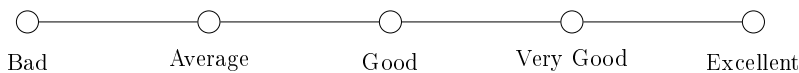
--	--	--

2. Evaluate the Phantom Joystick according to the following requirements:

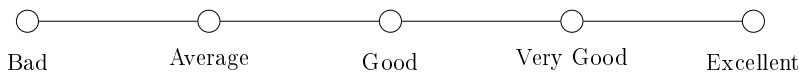
- Intuitiveness



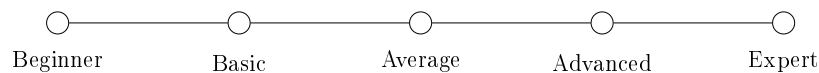
- Ease of use



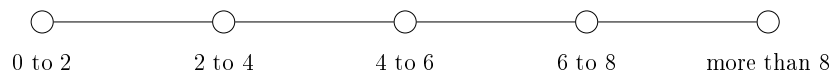
- Confidence of use



3. How do you evaluate your computer skills knowledge?



4. How many hours (per week) you spend on video games?



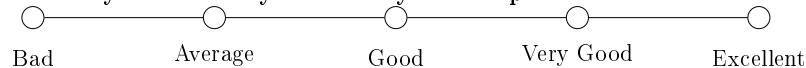
5. Have you ever tried a haptic device such as the Phantom?

Yes No
☐ ☐

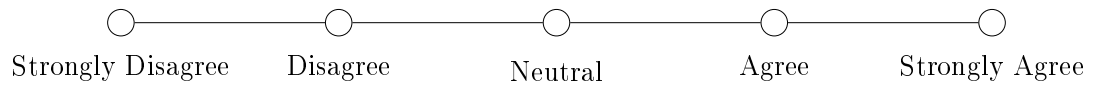
6. Have you ever teleoperated a robot?

Yes No
☐ ☐

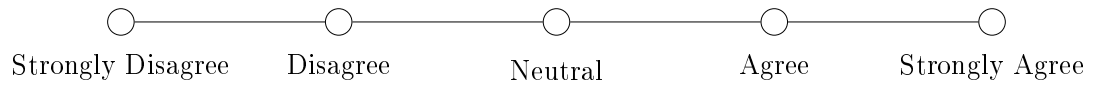
7. How do you evaluate your hability to teleoperate a robot?



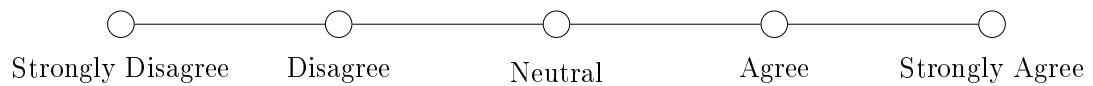
8. **The force feedback increased my perception of obstacles.**



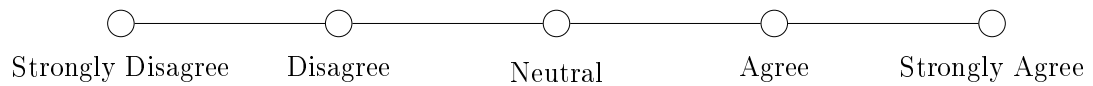
9. **It was easier to perform the task without force feedback.**



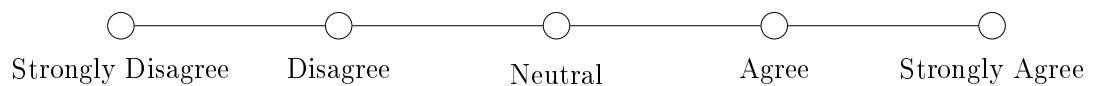
10. **The force map increased my perception of obstacles.**



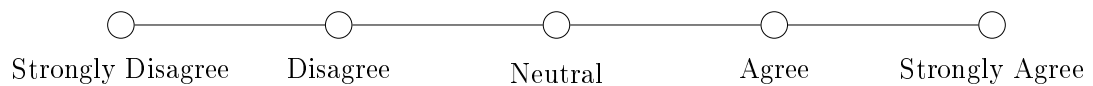
11. **It was easier to perform the task with force feedback.**



12. **It was easier to perform the task with mono vision.**



13. **It was easier to perform the task with stereo vision.**



Chapter 11

IROS 2017

2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)
September 24–28, 2017, Vancouver, BC, Canada

Evaluation methodology for teleoperation interfaces*

Aline Xavier Fidêncio^{1,2}, Jhony Alan Tavares Ferreira^{1,2}, Gustavo Medeiros Freitas¹, Héctor Azpúrua¹,
Felipe Rigueira Campos², Paulo Marcos de Barros Monteiro² and Wilson Miola¹

Abstract—In the mining industry, achieving a consistent and efficient production process has always been crucial. Therefore, the utilization of teleoperation techniques rises as a relevant solution to the problem. However, besides the development of teleoperation interfaces, it is also important to evaluate its suitability to the user. Hence, this paper presents the application of a methodology for evaluating such interfaces. A simplified experiment was conducted in a controlled environment using a mobile platform driven through obstacles with a teleoperation interface consisting of video and haptic devices. Results indicate that the utilization of such methodology can significantly contribute to the development of robust teleoperation interfaces.

I. INTRODUCTION

The utilization of autonomous equipment has grown as one of the most efficient ways to improve productivity and operator's safety. However, as in some cases, the operator's intervention is still required, teleoperated equipment is used as a relevant solution to the problem. In order to provide the operators with a realistic experience, different solutions are proposed. Still, it is also relevant to validate these solutions from the user's perspective. This work presents the utilization of a methodology based on questionnaires to evaluate teleoperation interfaces in terms of user's sense of immersion and his satisfaction with the teleoperation.

II. PROPOSAL

The problem addressed in this work is the application of evaluation methodologies for teleoperation interfaces. The solution proposed focuses on how controller's characteristics and user's comfort with the device increase his sense of immersion and performance.

Our tested methodology is based on the questionnaire proposed by Witmer [1], which measures the presence degree observed by the operator. Moreover, it includes a final interview to gather user's perception, with regard to the interface and the experience, directly from him. Questions included: how well they could control the events, how natural were the commands and how aware they were of the video and control devices. The experiment design explores ideas from the tests conducted by Kechavarzi [2]. After performing each task, the users were asked to answer the questionnaire.

*This work was supported by VALE, CAPES, CNPq and FAPEMIG.
¹Instituto Tecnológico Vale (ITV) - Ouro Preto, MG, Brazil {aline.fidencio@gmail.com, jhonytavares@yahoo.com.br, gustavo.medeiros.freitas@itv.org, {hector.azpuru, wilson.miola}@itv.org
²Federal University of Ouro Preto - Ouro Preto, MG, Brazil {pmemop, rigueiracampos}@gmail.com

The use of such methodology can be divided into two major steps: (i) definition of a task in which the interface can be used and (ii) subject selection. Ideally, the subjects' sample should be heterogeneous and consider that the familiarity with technology could affect user's performance.

The viability of the application of such methodology was analyzed through a proof-of-concept, controlled set of tests. The teleoperation interface evaluated consisted of video and haptic devices. To perform the experiments, the haptic device 'Novint Falcon' and the robotic platform 'Seekur Jr' equipped with a laser ranger SICK LMS-111 and a camera Axis P1124E were used. The communication and control of the system were made via ROS.

A simplified scenario representing an environment with obstacles was created and the operator had to control the navigation of the robotic platform (Figure 1) using the haptic device, avoiding collisions and performing the proposed tasks. Data obtained by the laser was used to map the environment and a force feedback was given to the user through the Falcon, according to obstacle's location and distance. The purpose of such force is to provide the user with additional information about the presence of obstacles in the environment around the robotic platform.



(a) Local site (operator). (b) Remote site (robot).

Fig. 1: Simplified testing environment.

Results highlighted strengths and weaknesses of the analyzed interface. Future works include to perform the test with more subjects and provide better visual information by using stereo images. Future tests include applying such methodology in real tests with mining equipment.

REFERENCES

- [1] Witmer, B. G. and Singer, M. J. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and virtual environments* 7(3): 225-240.
- [2] Kechavarzi, B. D., Sabanovic, S. and Weisman, K. (2012). Evaluation of control factors affecting the operator's immersion and performance in robotic teleoperation, *2012 IEEE RO-MAN*, pp. 608-613.

Implementation of an autonomous mobile platform for loading explosives in mining applications

Jhony Alan Tavares Ferreira¹ and Aline Xavier Fidêncio¹ and Héctor I. Azpúrua¹
and Gustavo M. Freitas¹ and Wilson Miola¹

Abstract—The development of mining technologies has grown significantly in recent years. For mining companies, the adoption of new technologies on automation and remote operation represents a significant opportunity for gains in productivity and safety. This paper describes the development of an integrated solution for autonomous explosive loading applied to mining processes. This method can reduce or eliminate the risks to which operators are exposed in environments such as rock blast areas. The proposed solution was validated with simulated and real tests. Tests were carried out in a laboratory, using a mobile platform with a robotic arm.

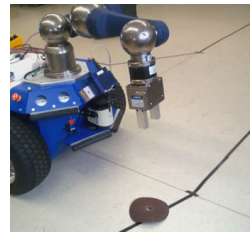
I. INTRODUCTION

Rock blasting in the mining context is the material removal of a vertical structure within the mine, by the explosion one or multiple holes, to generate new horizontal platforms. Although there was progress in the security of operations with explosives, fatalities still occur, mainly due to the improper handling of explosives and the inadequate safety of the detonation area. This work proposes a prospective study and proof of concept on the programming of autonomous equipment to perform explosive loading.

II. PROPOSAL

The problem addressed in this work is the autonomous loading of explosives, which consists of the insertion of charges into the detonation holes prepared at the blasting area. Our proposed solution to this problem can be divided into three major steps: (i) Autonomous navigation (ii) Image processing for hole detection and (iii) Manipulation of the robotic arm. The communication and control of the system were made via ROS. The platform used to perform the charge loading is a ‘Seekur Jr’ robot equipped with a ‘Schunk Powerball’ arm with 6 DOF, a laser ranger SICK LMS-111 and a stereo camera.

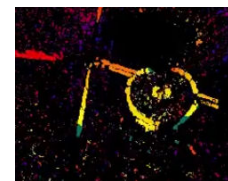
By using the map generated by using a *Rao-Blackwellized particle filter* implementation [1], the shortest path to the approximate location of the hole is calculated using the Dijkstra algorithm. That global path is used as a reference to plan the local trajectories with obstacles avoidance using the *Trajectory Rollout* algorithm [2]. Then, image processing is used to locate the position of the hole with respect to the platform. The hole is identified by an elliptical detector [3] and the disparity map of the stereo cameras are used to give



(a) The robot automatically reaches the hole location and activates the robotic arm.



(b) Location of the drill hole ellipse detection.



(c) Disparity map

Fig. 1: Preliminary results of autonomous explosive loading.

the approximate real distance to the hole. Finally, this data is used to generate a trajectory for the robotic arm by using the *Rapidly Exploring Random Trees* (RRT) [4] to reach the hole and simulate the discharge of explosives. Several validations are applied so the robot arm doesn't perform invalid movements that could harm itself or the robot.

Tests were performed on a controlled scenario (Figure 1a), and using a black circle to simulate a hole (Figure 1b and 1c). Future works will improve the performance of the obstacle avoidance algorithm, and the localization method will integrate other sensors such as GPS. Plans for future tests include performing in a real mining scenario and an improved method for explosive loading simulation with a hose.

REFERENCES

- [1] G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard, “Improving grid-based slam with rao-blackwellized particle filters by adaptive proposals and selective resampling,” in *Proceedings ICRA 2005*. IEEE, 2005.
- [2] B. P. Gerkey and K. Konolige, “Planning and control in unstructured terrain,” in *ICRA Workshop on Path Planning on Costmaps*, 2008.
- [3] M. Fornaciari, A. Prati, and R. Cucchiara, “A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications,” *Pattern Recognition*, vol. 47, no. 11, pp. 3693–3708, 2014.
- [4] J. Kuffner and S. L. RRT-Connect, “An efficient approach to single-query path planning,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, pp. 473–479, 2000.

*This work was supported by Instituto Tecnológico Vale (ITV)
¹Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto, MG, Brazil
jhonytavares@yahoo.com.br, aline.fidencio@gmail.com, {hector.azpuru, gustavo.freitas, wilson.miola}@itv.org

Chapter 12

SBAI 2017



XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente
Porto Alegre – RS, 12 – 4 de Outubro de 2017

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE INTERFACES DE TELEOPERAÇÃO

ALINE XAVIER FIDÊNCIO^{*†}, JHONY ALAN TAVARES FERREIRA^{*†}, GUSTAVO MEDEIROS FREITAS^{*},
PAULO MARCOS DE BARROS MONTEIRO[†], FELIPE RIGUEIRA CAMPOS[†], HÉCTOR AZPÚRUA^{*}, WILSON
MIOLA^{*}

^{*}*Instituto Tecnológico Vale
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

[†]*Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

Emails: aline.fidencio@gmail.com, jhonytavares@yahoo.com.br,
gustavo.medeiros.freitas@itv.org, rigueiracampos@gmail.com, hector.azpuru@itv.org,
pmemop@gmail.com, wilson.miola@itv.org

Abstract— In the mining industry, operator's safety has always been crucial. Furthermore, achieving a consistent and efficient production process is also relevant. To increase productivity and safety in mining operations, researches try to achieve a semi-autonomous or even autonomous mine and the utilization of teleoperation techniques rises as a relevant solution to the problem. However, besides the development of teleoperation interfaces, also important is to evaluate its suitability to the user. Hence, this paper presents the application of a methodology for evaluating teleoperation interfaces. A simplified experiment was conducted in laboratory using a commercial mobile robotic platform driven through a testing scenario with obstacles and a teleoperation interface consisting of video and haptic devices. Results indicate that the utilization of such methodology can significantly contribute to the development of robust teleoperation interfaces.

Keywords— robotics platforms, teleoperation, evaluation methodology, force feedback

Resumo— Na indústria da mineração, a segurança do operador sempre foi crucial. Além disso, a busca por um processo de produção consistente e eficiente é também relevante. Para aumentar a produtividade e a segurança nas operações da mineração, pesquisas têm buscado alcançar uma mina semiautônoma, ou mesmo autônoma, e a utilização de técnicas de teleoperação é apresentada como uma solução relevante para o problema. No entanto, além do desenvolvimento de interfaces de teleoperação, é também necessário validar sua adequação diante do operador. Dessa forma, este trabalho apresenta a aplicação de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. Um experimento simplificado foi conduzido em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel comercial guiada em um cenário teste com obstáculos e uma interface de teleoperação contendo dispositivos de vídeo e háptico. Os resultados indicam que a utilização de tal metodologia pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de interfaces robustas de teleoperação.

Palavras-chave— plataformas robóticas, teleoperação, metodologia de avaliação, realimentação de força

1 Introdução

A indústria da mineração é caracterizada por altos investimentos em capital e tempo. Tais investimentos envolvem, em diferentes estágios do empreendimento, atividades de inspeção, monitoramento e manipulação em ambientes perigosos ou de difícil acesso ao ser humano.

A utilização de equipamentos autônomos vem crescendo como uma das formas mais eficientes de se reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade e a segurança do operador. Mas, devido principalmente às dificuldades inerentes às tarefas a serem realizadas pelos equipamentos, em muitos casos a intervenção do operador, mesmo que mínima, ainda se faz necessária. Assim, a utilização de equipamentos teleoperados é apresentada como uma solução relevante para o problema.

Os desafios impostos pela tarefa de teleoperação de equipamentos são inúmeros, e as soluções encontradas envolvem as mais diversas áreas de conhecimento. Apesar da separação física entre operador e equipamento, deseja-se criar uma

experiência natural e realista com o ambiente remoto, de modo que ele tenha a sensação de estar interagindo diretamente com o ambiente, porém sem as perturbações típicas do mesmo (ruído, vibrações, calor, etc) e com a possibilidade de ampliação dessa percepção pela inclusão de dispositivos de instrumentação tais como sensores de torque e força, câmeras estéreo ou hiperespectrais, microfones, etc.

Dessa forma, pesquisas tem sido desenvolvidas com o objetivo de aplicar técnicas de teleoperação a equipamentos de mineração. No entanto, não somente é necessária a implementação de tais sistemas, mas também sua validação diante do usuário. Essa validação deve incluir a análise de aspectos que afetam o senso de imersão do usuário e sua satisfação geral com a teleoperação.

Neste trabalho, a aplicação de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação é analisada. A metodologia adotada utiliza questionários que focam em analisar como características do controlador e o conforto do usuário com o dispositivo aumentam o senso de imersão e alteram

o desempenho. Para validar a viabilidade da aplicação da metodologia, um teste de conceito foi realizado através de um experimento teste inicial conduzido em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel comercial. O experimento consistiu em guiar a plataforma robótica em um cenário contendo obstáculos, utilizando uma interface de teleoperação composta por dispositivos de vídeo e háptico.

A organização do artigo é descrita a seguir. A Seção 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre teleoperação de equipamentos e trabalhos que propõem metodologias de avaliação de interfaces de teleoperação. A metodologia de avaliação aplicada neste trabalho é apresentada na Seção 3. Na Seção 4 é apresentado o procedimento experimental adotado. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos experimentos. Por fim, a Seção 6 finaliza este artigo com as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Teleoperação, vista como um dos aspectos mais antigos da própria robótica, pode ser definida como robótica à distância (Niemeyer et al., 2008). Na teleoperação, qualquer planejamento de alto nível ou decisão são feitos pelo operador, enquanto que o equipamento é responsável pela implementação mecânica do sistema.

O conceito de teleoperação não é recente e o primeiro trabalho desenvolvido é atribuído a Raymond C. Goertz (Goertz, 1952; Goertz e Bevilacqua, 1952; Goertz, 1954), que desenvolveu sistemas eletro-mecânicos para manipulação de materiais radioativos nas décadas de 1940-1950.

O estudo da teleoperação foi sempre impulsionado por motivos de:

- segurança humana em ambientes adversos (plantas nucleares e químicas);
- alto custo para se atingir certos locais (espaço);
- dificuldade de acesso (micromanipulação).

Com isso, sua aplicação se estende às mais diversas áreas: robótica espacial (Yoshida e Wilcox, 2008; Bibby e Necessary, n.d.), ambientes perigosos e situações de regaste (Murphy et al., 2008; Murphy, 2004), sistemas médicos e reabilitação (Van der Loos e Reinkensmeyer, 2008) e na indústria da mineração (Corke et al., 2008).

Além da definição das interfaces de teleoperação, são necessárias metodologias para avaliação da adequação dessas interfaces diante dos usuários. Isso porque, apesar da separação física entre operador e equipamento, deseja-se prover ao operador uma experiência natural e realista com o ambiente remoto, de tal forma que ele tenha a sensação de estar presente no ambiente.

De acordo com Witmer (Witmer e Singer, 1998), presença é o estado psicológico de “estar

lá” mediado por um ambiente que engaja nossos sentidos, captura nossa atenção e promove nosso envolvimento ativo. O nível de presença observado depende da fidelidade dos componentes sensoriais, da natureza das interações e tarefas solicitadas e da concentração do usuário.

Dessa forma, propostas de metodologias para avaliar o desempenho de interfaces de teleoperação do ponto de vista do usuário vem sendo estudadas há anos. Em grande parte, essas propostas focam em desenvolver medidas para analisar o grau de presença e envolvimento dos usuários durante a realização das tarefas de teleoperação.

Trabalhos de autores que propuseram diferentes metodologias para avaliar o senso de presença de usuários são relacionados em (Witmer e Singer, 1998). Além disso, é proposto o *Presence Questionnaire (PQ)*, um questionário que tem sido amplamente utilizado como uma das principais metodologias de avaliação do senso de presença e imersão de usuários de interfaces de teleoperação (Sallnäs et al., 2000; Kechavarzi et al., 2012; Silva et al., 2016; Lee et al., 2016). Esse questionário conta com 33 questões e seus itens podem ser agrupados em quatro fatores principais envolvidos no senso de presença: (1) Envolvimento, (2) Adaptação/Imersão, (3) Fidelidade Sensorial e (4) Qualidade da Interface.

3 Metodologia de Avaliação

A metodologia aplicada foca em como o conforto do usuário com o controlador e suas características aumentam o senso de imersão e alteram o desempenho, em termos de tempo e acurácia de realização da tarefa, além da satisfação geral do usuário com a teleoperação.

Para aplicação dessa metodologia devem ser definidos um experimento teste, no qual a interface possa ser utilizada, e um grupo de participantes. Idealmente, considerando que a familiaridade com novas tecnologias possa ter efeito sobre o desempenho, os participantes devem possuir diferentes áreas de atuação. Ao se diversificar a amostra, é possível analisar a adequação da interface de teleoperação diante de usuários não treinados.

Depois de realizar cada uma das tarefas propostas, os participantes são submetidos a um questionário para avaliar sua satisfação com o dispositivo e seu senso de imersão. A metodologia adotada utiliza uma adaptação do *PQ* para medir o grau de presença observado pelos participantes.

O questionário original foi adaptado de tal forma que suas perguntas se tornaram itens em uma escala de Likert. O questionário final possui três escalas: envolvimento, adaptação/imersão e qualidade da interface. Juntas, elas definem o nível de presença observado pelo usuário.

Itens de Likert são amplamente utilizados quando se deseja conhecer em detalhes a opinião

do entrevistado diante de uma afirmação apresentada. Dessa forma, ao final dos testes é possível analisar cada item separadamente ou em conjunto (escala) e, através da utilização de análises estatísticas adequadas, algumas informações e conclusões podem ser obtidas. Um exemplo seria a seguinte afirmação “A explicação sobre a escala de Likert foi esclarecedora.”, juntamente com as seguintes opções de resposta:



Por fim, a metodologia adotada contém uma entrevista conduzida ao final do experimento com todos os participantes. O objetivo dessa entrevista é obter a percepção diretamente dos usuários com relação à interface e à experiência de teleoperação e traçar o perfil do usuário com relação à sua familiaridade com dispositivos hápticos e com a teleoperação de robôs.

A partir dos dados obtidos com os questionários e entrevista, algumas análises estatísticas podem ser conduzidas para avaliação dos resultados obtidos. Para os experimentos realizados neste trabalho, considerando que o número de amostras analisadas é, estatisticamente falando, pequeno ($n < 100$), o teste t (Trochim, 2006), utilizado para avaliar se duas médias são estatisticamente diferentes, foi utilizado nas análises.

Para expressar os resultados obtidos a partir da aplicação do teste t , a seguinte nomenclatura foi adotada: $T(gl) = valor1, p = .valor2$, onde gl representa os graus de liberdade; $valor1$, o valor t , e $valor2$ representa o valor p . Além disso, os dados das amostras são expressos em termos de sua média (M) e erro padrão (EP): $M = média$; $EP = erro\ padrão$.

A viabilidade da aplicação desta metodologia foi analisada através de um teste em laboratório. Um ambiente simplificado representando um cenário com obstáculos foi montado em escala experimental e o objetivo do operador era controlar a navegação da plataforma robótica no ambiente, evitando colisões com os obstáculos e realizando as tarefas propostas.

4 Procedimento Experimental

Nesta seção, é apresentado o procedimento utilizado para avaliação da interface de teleoperação.

4.1 Participantes

Os participantes deste estudo foram recrutados através da divulgação direta do experimento a ser conduzido. Foram selecionados 15 homens e 1 mulher, com idade média de 26 anos, a partir de sua disponibilidade, e com diferentes níveis e escolaridade e áreas de atuação : 3 de Humanas (Música, Administração), 10 de Ciências Exatas (Computação, Eng. Elétrica, Eng. de Controle e Automação, Eng. Mecânica) e 3 não declarados. Além disso, como pode ser observado ao final do experimento através da entrevista conduzida, os participantes possuíam diferentes níveis de familiaridade com dispositivos hápticos e com a teleoperação de robôs.

Cabe ressaltar que o número de participantes selecionados será elevado em experimentos futuros. No entanto, para o teste inicial proposto este número é suficiente.

4.2 Componentes

Abaixo são descritos os equipamentos e demais materiais utilizados neste experimento.

4.2.1 Plataforma Robótica

Os experimentos foram conduzidos utilizando uma plataforma robótica móvel Seekur Jr. (Figura 1) e um cenário simplificado representando um ambiente com obstáculos montado em laboratório.



Figura 1: Plataforma Robótica Seekur Jr.

O Seekur Jr. integra diversos dispositivos:

- Câmera PTZ RVision SEE
- Câmera estéreo MobileRanger C3D
- Laser range finder SICK LMS-111
- GPS Trimble AG-372 GNSS receiver

Para o experimento em questão, somente o laser foi utilizado para detecção de obstáculos. O laser realiza a medição da distância de objetos localizados a até 20m em uma faixa de 270°. Caso os objetos detectados estejam dentro da área de colisão com a plataforma robótica, uma força proporcional a essa distância é aplicada no *joystick*. A direção desta força é definida pela localização do obstáculo detectado.

Além disso, uma câmera Axis P1224E foi integrada ao Seekur Jr.. As imagens obtidas dessa câmera foram projetadas em um monitor LCD, for-

necendo as imagens utilizadas pelo operador para teleoperar a plataforma.

4.2.2 Dispositivo de Controle

Dispositivos hápticos são amplamente utilizados em diversas áreas. Para aumentar o desempenho do operador, em ambientes simulados ou teleoperados, interfaces hápticas são utilizadas para proporcionar aos operadores a sensação de estar tocando o ambiente real diretamente (Hannaford e Okamura, 2008).

Além de tentar replicar ou aprimorar a sensação de toque ou manipulação, as interfaces hápticas são utilizadas para ampliar a percepção do ambiente real. Neste experimento, como ao utilizar uma câmera monocular a noção de profundidade é perdida por parte do operador, a realimentação de força é utilizada em um dispositivo háptico para suprir a deficiência causada pela perda de informações. Com isso, a realimentação de força proporciona ao usuário informações adicionais sobre a presença de obstáculos ao redor da plataforma robótica ao longo do percurso.

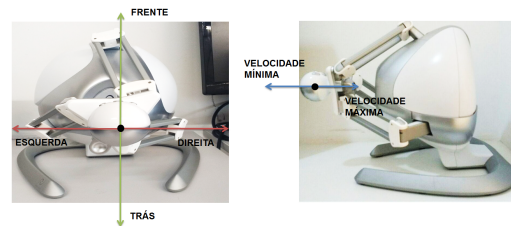
Assim, para controlar a plataforma robótica, foi utilizado o Novint Falcon, um *joystick* háptico de 3 graus de liberdade. Inicialmente desenvolvido para jogos, o Falcon tem encontrado espaço em diversas aplicações por possuir o recurso de realimentação de força e preço acessível (Martin e Hillier, 2009; Vanacken et al., 2010; Renon et al., 2013; Davies et al., 2009). Cabe ressaltar que o Falcon é comumente utilizado para propósitos de testes de conceito em laboratório, diferenciando-se, portanto, de *joysticks* desenvolvidos para controle de equipamentos.

Para atuar como dispositivo de controle, duas configurações de comando foram estabelecidas para o Falcon. Essas configurações se diferenciam quanto aos eixos que são utilizados e a função de cada um deles. Os comandos para as configurações 1 e 2 do Falcon podem ser vistos nas Figuras 2a e 2b, respectivamente. Durante os experimentos, os participantes utilizaram as duas configurações.

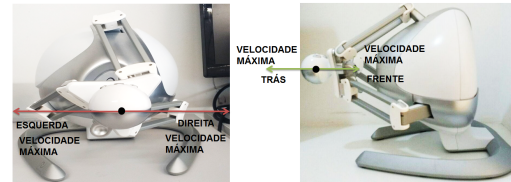
A realimentação de força do Falcon foi definida de acordo com a detecção de obstáculos no ambiente. Para isso, foram utilizados os dados de distância e ângulo de medição obtidos do laser situado na plataforma robótica.

4.2.3 Questionário e Entrevista

Durante os experimentos, os participantes realizaram duas tarefas distintas utilizando as diferentes configurações do Falcon, com e sem realimentação de força. Depois de realizar cada tarefa, eles responderam o questionário para avaliar sua satisfação com o dispositivo e seu senso de imersão.



(a) Comandos para a Configuração 1 do Falcon.



(b) Comandos para a Configuração 2 do Falcon.

Figura 2: Comandos para as configurações do Falcon.

As questões foram adaptadas¹ de (Witmer e Singer, 1998) para adequá-las à realidade dos experimentos conduzidos através da exclusão de perguntas referentes a som e à manipulação de objetos, uma vez que a montagem utilizada não fornecia tais recursos. Assim, as questões incluíram perguntas tais como quão bem eles puderam controlar os eventos, quão naturais as interações com o ambiente foram e quão ciente eles estavam dos dispositivos de vídeo e de controle.

4.3 Condução dos Experimentos

Ao chegar ao laboratório, os participantes puderam ver o robô que iriam controlar remotamente, mas não puderam controlá-lo previamente ou estudar o ambiente no qual as tarefas seriam realizadas. Cada participante realizou duas tarefas, cujas representações esquemáticas podem ser vistas na Figura 3.

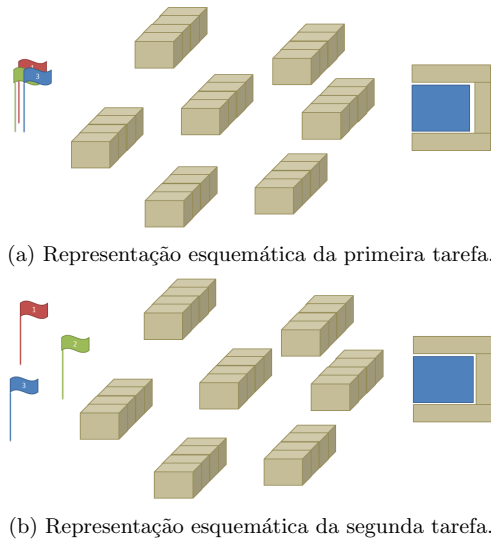
A Figura 4 mostra o ambiente no qual os testes foram realizados, destacando a separação física entre o operador e a plataforma robótica teleoperada².

Na primeira tarefa, o objetivo era percorrer o caminho entre as paredes, contornar o conjunto de cones e estacionar o robô no seu ponto inicial. Para a segunda tarefa, a única diferença é que os cones deveriam ser contornados de acordo com a cor-numeração: 1-vermelho, 2-verde, 3-azul.

A primeira tarefa foi realizada uma vez com cada configuração do *joystick* sem a realimentação de força. Nesse caso, a ordem com que as configurações foram apresentadas para os participantes foi aleatória. Logo após, foi solicitado que o participante escolhesse a configuração preferida.

¹O questionário utilizado pode ser encontrado em <https://github.com/aline-fidencio/presenceQuestionnaire>.

²Um vídeo sobre os testes realizados pode ser encontrado em: <https://youtu.be/4HMjSov66mU>



(a) Representação esquemática da primeira tarefa.

(b) Representação esquemática da segunda tarefa.

Figura 3: Representação esquemática das tarefas.

Com a configuração escolhida, o participante repetiu a primeira tarefa com a realimentação de força do Falcon ativada. Por fim, o participante realizou a segunda tarefa utilizando a configuração escolhida, com e sem realimentação de força, e, de forma semelhante, a ordem de utilização ou não da realimentação de força foi aleatória.

Durante a realização das tarefas, o tempo de execução de cada uma foi anotado, bem como o número de obstáculos colididos. Além disso, foi estabelecido um nível de conclusão das tarefas.

Após completar cada uma das cinco tarefas, os participantes responderam o questionário de avaliação da experiência, totalizando cinco questionários por participante. Por fim, após a realização de todas as tarefas, os participantes responderam à entrevista final, na qual foram abordadas questões envolvendo o conforto e a facilidade de uso das configurações, a sensação de imersão do participante e sua percepção diante do uso da realimentação de força para a detecção de obstáculos.

5 Resultados

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.1 Tarefa e Tempo de Execução

A Tabela 1 apresenta os tempos de execução de cada tarefa para cada configuração do *joystick*.

De acordo com o teste *t*, não existem diferenças significativas entre os tempos de execução das tarefas ($T(49) = 0.79, p = .44$). A comparação direta entre os tempos de execução, no entanto, sugere que o tempo para completar a segunda tarefa ($M = 00:06:26$; $EP = 00:01:01$) é maior que para a primeira tarefa ($M = 00:05:32$; $EP = 00:00:33$). Esse resultado é consistente com as características das tarefas



(a) Ambiente do operador (local).



(b) Ambiente da plataforma robótica (remoto).

Figura 4: Ambiente de realização dos testes.

uma vez que a segunda tarefa demandou que o participante navegasse com o robô por um trajeto mais longo. No entanto, o tempo de execução varia de forma significativa entre as configurações ($T(48) = 2.21, p = .03$) e a comparação desses tempos sugere que o tempo de realização das tarefas com a configuração 1 do Falcon ($M = 00:07:01$; $EP = 00:00:02$) é maior que para a configuração 2 ($M = 00:04:46$; $EP = 00:00:00$).

Ao analisar se as áreas de atuação dos participantes teriam algum efeito sobre seu desempenho, diferenças significativas foram encontradas enquanto comparando as áreas de Humanas vs Exatas ($T(64) = 2.54, p = .007$) e Exatas vs Não Declarados ($T(59) = 3.30, p = .002$). Nenhuma diferença significativa foi encontrada entre os tempos de execução para Humanas vs Não Declarados ($T(28) = 1.29, p = .021$). Esse resultado sugere que participantes atuantes em áreas nas quais a exposição à tecnologia tipicamente é maior tendem a mais rapidamente se familiarizarem ao dispositivo de controle e realizar as tarefas.

5.2 Acurácia no Controle e Conclusão da Tarefa

O desempenho de cada participante também foi avaliado mediante observação da movimentação do robô no ambiente e do nível de conclusão da tarefa. A Tabela 2 apresenta a porcentagem de conclusão de cada uma das tarefas.

Não existe diferença significativa na acurácia ao se comparar as configurações do *joystick* ($T(78) = 1.66, p = .10$) ou as tarefas

Tabela 1: Tempo médio (min) para execução e erro padrão (EP) para as tarefas e configurações para todos os participantes (n = 16).

Configuração		Tarefa 1	Tarefa 2
		M = 00:05:55; EP = 00:00:53	M = 00:07:58; EP = 00:02:55
Configuração 1	Sem força	M = 00:05:55; EP = 00:00:53	M = 00:07:58; EP = 00:02:55
	Com força	M = 00:06:55; EP = 00:02:24	M = 00:08:23; EP = 00:02:49
Configuração 2	Sem força	M = 00:05:14; EP = 00:00:44	M = 00:03:57; EP = 00:00:21
	Com força	M = 00:04:41; EP = 00:00:20	M = 00:04:43; EP = 00:00:26

Tabela 2: Porcentagem de conclusão das tarefas.

	Tarefa 1	Tarefa 2
Configuração 1	54.17	62.50
Configuração 2	75.00	75.00

($T(78) = 0.40$, $p = .69$). Logo, observa-se que as configurações não tem efeitos distintos sobre a acurácia na realização das tarefas e que a relação configuração-tarefa também não afeta a acurácia.

Ao analisar a quantidade de obstáculos atingidos em cada caso, também não foram encontradas diferenças significativas, exceto para a primeira tarefa, utilizando a configuração 2 do Falcon com realimentação de força (M = 1.00; EP = 0.27) e sem realimentação de força (M = 2.97; EP = 0.62) ($T(20) = 2.86$, $p = .01$). No entanto, a comparação direta entre os valores sugere que a realização das tarefas com a realimentação de força reduz o número de obstáculos atingidos (Tabela 3).

Considerando a percepção dos participantes através da entrevista final, a maioria concordou (82.3%³) que a realimentação de força aumentou a percepção de obstáculos. Além disso, os participantes se mostraram indiferentes (54.7%³) diante da facilidade de realização das tarefas sem a realimentação de força e concordaram (67.2%³) que foi mais fácil a realização das tarefas com a realimentação (mesmo não havendo diferenças significativas nos tempos e acurácia de execução). Segundo muitos participantes, a realimentação de força contribuiu significativamente para a detecção de obstáculos; no entanto, ela limitava a liberdade de comando. Essa percepção pode ter contribuído para a baixa aceitação da realimentação de força, sendo um fato que merece, portanto, um estudo mais aprofundado.

5.3 Senso de Imersão

Nenhuma diferença significativa foi encontrada ao comparar as diferentes configurações utilizadas, tanto com realimentação de força quanto sem, em termos do senso de imersão percebido pelo participante. Isso sugere que nenhuma das configurações do *joystick* apresenta vantagens ou desvantagens evidentes. Além disso, não há evidências de que a avaliação do usuário para cada configuração tenha alguma relação com o senso de imersão do mesmo.

³porcentagem obtida através da escala de Likert.

Cabe ressaltar, no entanto, que o senso de imersão (67.5%) sugere que os participantes se envolveram nas tarefas que estavam realizando. No entanto, alterações no sistema podem trazer melhorias nesse sentido. Dentre os 16 participantes, 10 mencionaram que a resolução e os atrasos das imagens da câmera dificultaram a realização das tarefas e a identificação do ambiente. Além disso, sendo o *joystick* e a experiência de teleoperação novos para a maioria dos participantes, a ansiedade dos mesmos diante desse novo sistema pode ter atuado como um fator de distração.

5.4 Entrevista Final

A entrevista final mostrou que, de maneira geral, os participantes se mostraram satisfeitos com a teleoperação. Eles foram solicitados a descrever a experiência utilizando três palavras. Foram obtidas 35 palavras distintas. Essas palavras foram agrupadas em positivas (e.g. interessante, contagiante, instigante), negativas (e.g. doloroso, instável, incapacidade), neutras (e.g. real, nova, usual) e outras (e.g. eu, experiência, avançada). A maioria, 45%, avaliou de maneira positiva, 14% de maneira negativa, 22% foram avaliações neutras e 17% foram palavras que não puderam ser encaixadas nas categorias anteriores.

As configurações do Falcon também foram avaliadas de acordo com três quesitos: intuitividade, facilidade de utilização e confiança no uso. Os resultados mostram que não existe um consenso entre as configurações, como pode ser visto na Figura 5. Nesse ponto, cabe ressaltar que alguns participantes não avaliaram as duas configurações segundo todos os quesitos. No entanto, esse resultado sugere que tornar as configurações de comando de um dispositivo de controle parametrizáveis a cada operador pode trazer maiores benefícios ao cobrir diferentes expectativas.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Com o objetivo de minimizar os riscos a que estão expostos os operadores em diferentes atividades e aumentar a produtividade, diversas empresas tem buscado a utilização de sistemas automatizados. Muitas soluções propostas apontam para a utilização de técnicas de teleoperação de equipamentos, uma vez que em muitos casos a intervenção do operador/especialista, mesmo que mínima, ainda

Tabela 3: Quantidade média de obstáculos atingidos e erro padrão (EP) para as tarefas e configurações para todos os participantes (n = 16).

		Tarefa 1	Tarefa 2
Configuração 1	Sem força	M = 2.50; EP = 0.47	M = 3.50; EP = 0.80
	Com força	M = 1.88; EP = 0.83	M = 2.13; EP = 0.58
Configuração 2	Sem força	M = 2.94; EP = 0.62	M = 2.63; EP = 0.53
	Com força	M = 1.00; EP = 0.27	M = 2.38; EP = 0.93

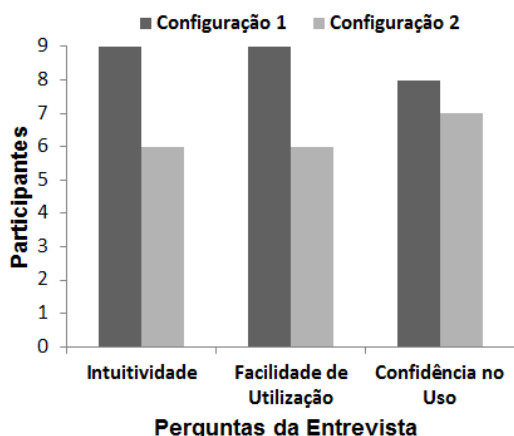


Figura 5: Avaliação das configurações do Novint Falcon na entrevista final.

se faz necessária. Esse cenário, obviamente, não é diferente dentro das indústrias de mineração.

Com a aplicação da teleoperação, é possível, além de reduzir os riscos a que o operador está exposto durante a realização de suas atividades, melhorar o desempenho na operação dos equipamentos. No entanto, ao se construir uma interface de teleoperação, é igualmente relevante a validação dessa interface do ponto de vista do usuário.

Desse modo, este trabalho apresentou a utilização de uma metodologia para avaliação de interfaces de teleoperação. Sua aplicação foi analisada durante um experimento teste simplificado, e os resultados mostram que ela aponta para pontos fracos e fortes na interface sendo analisada.

Apesar desses resultados serem preliminares, alguns fatores importantes puderam ser observados. Há evidências de que usuários que tem maior contato com tecnologia apresentam maior facilidade de adaptação ao dispositivo de controle e conseguem realizar as tarefas mais rapidamente. Enquanto esse resultado sugere que é interessante a seleção de operadores de acordo com algumas características preexistentes, ele também mostra que é importante o contato com tecnologia para permitir a um público maior a habilidade e confiança para teleoperar robôs.

Além disso, a avaliação das configurações do *joystick* mostra que, por cobrir diferentes expectativas, a possibilidade de personalização a cada operador pode trazer benefícios ao permitir a adaptação do sistema a diferentes usuários.

Por fim, apesar da baixa aceitação da realimentação de força, a maioria dos participantes concorda que ela aumentou significativamente a percepção de obstáculos. Esse resultado mostra que fornecer informações adicionais ao operador através de diferentes sentidos influencia positivamente a execução de suas tarefas.

Com isso, é possível observar que a aplicação de tais metodologias pode trazer benefícios significativos durante o desenvolvimento de interfaces robustas de teleoperação.

Considerando a interface utilizada para o experimento inicial, os resultados mostram que, apesar de positivos, ainda existem vários pontos que podem e devem ser melhorados. Assim, trabalhos futuros incluem:

- Realizar o experimento com uma amostra de tamanho mais significativo;
- Realizar o experimento com usuários de perfis voltados para a operação de equipamentos de mineração;
- Utilizar tarefas com níveis de dificuldade mais distintos durante a realização dos testes;
- Melhorar as informações visuais fornecidas ao operador através da inclusão, por exemplo, de um óculos de realidade virtual e uma câmera estéreo;
- Permitir que o participante possa comandar a plataforma robótica previamente.

Por fim, tendo como alvo as aplicações na indústria da mineração, deseja-se desenvolver uma interface de teleoperação que possa ser aplicada a equipamentos de mineração, sejam eles utilizados em operações de exploração mineral, engenharia ou lavra. Assim, o objetivo é o desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação de interfaces de teleoperação que possa ser aplicada a esta interface a ser desenvolvida durante testes reais com equipamentos de mineração. Cabe ressaltar que para um cenário real a aplicação de tal metodologia apresentará diferentes níveis de dificuldades e que estas deverão ser consideradas durante o planejamento e a execução dos experimentos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, Vale S.A. e CNPq.

Referências

- Bibby, J. e Necessary, R. (n.d.). Robonaut 1, <https://robonaut.jsc.nasa.gov/R1/>. Acesso em: 07/12/2016.
- Corke, P., Roberts, J., Cunningham, J. e Hainsworth, D. (2008). *Mining Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1127–1150.
- Davies, R. A., Maskery, J. S. e John, N. W. (2009). Chemical education using feelable molecules, *Proc. of the 14th Int. Conf. on 3D Web Technology*, ACM, pp. 7–14.
- Goertz, R. (1952). Fundamentals of general-purpose remote manipulators, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 36–42.
- Goertz, R. (1954). Mechanical master-slave manipulator, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 45–46.
- Goertz, R. e Bevilacqua, F. (1952). A force-reflecting positional servomechanism, *Nucleonics (U.S.) Ceased publication* **10**(11): 43–45.
- Hannaford, B. e Okamura, A. M. (2008). *Haptics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 719–739.
- Kechavarzi, B. D., Sabanovic, S. e Weisman, K. (2012). Evaluation of control factors affecting the operator’s immersion and performance in robotic teleoperation, *2012 IEEE RO-MAN*, pp. 608–613.
- Lee, M., Kim, K., Daher, S., Raij, A., Schubert, R., Bailenson, J. e Welch, G. (2016). The wobbly table: Increased social presence via subtle incidental movement of a real-virtual table, *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 11–17.
- Martin, S. e Hillier, N. (2009). Characterisation of the novint falcon haptic device for application as a robot manipulator, *Australasian Conf. on Robotics and Automation (ACRA)*, Citeseer, pp. 291–292.
- Murphy, R. R. (2004). Trial by fire [rescue robots], *IEEE Robot. Automa. Mag.* **11**(3): 50–61.
- Murphy, R. R., Tadokoro, S., Nardi, D., Jacoff, A., Fiorini, P., Choset, H. e Erkmen, A. M. (2008). *Search and Rescue Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1151–1173.
- Niemeyer, G., Preusche, C. e Hirzinger, G. (2008). *Telerobotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 741–757.
- Renon, P., Yang, C., Ma, H. e Cui, R. (2013). Haptic interaction between human and virtual icub robot using novint falcon with chai3d and matlab, *Pro. of the 32nd Chinese Control Conf.*, pp. 6045–6050.
- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K. e Sjöström, C. (2000). Supporting presence in collaborative environments by haptic force feedback, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* **7**(4): 461–476.
- Silva, G. R., Donat, J. C., Rigoli, M. M., de Oliveira, F. R. e Kristensen, C. H. (2016). A questionnaire for measuring presence in virtual environments: factor analysis of the presence questionnaire and adaptation into brazilian portuguese, *Virtual Reality* **20**(4): 237–242.
- Trochim, W. M. (2006). The t-test, https://www.socialresearchmethods.net/kb/stat_t.php. Acesso em: 05/04/2017.
- Van der Loos, H. M. e Reinkensmeyer, D. J. (2008). *Rehabilitation and Health Care Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1223–1251.
- Vanacken, L., De Boeck, J. e Coninx, K. (2010). *The Phantom versus the Falcon: Force Feedback Magnitude Effects on User’s Performance during Target Acquisition*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 179–188.
- Witmer, B. G. e Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire, *Presence: Teleoperators and virtual environments* **7**(3): 225–240.
- Yoshida, K. e Wilcox, B. (2008). *Space Robots and Systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1031–1063.

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLATAFORMA MÓVEL E AUTÔNOMA PARA CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS NA MINERAÇÃO

JHONY ALAN TAVARES FERREIRA*[†], ALINE XAVIER FIDÊNCIO*[†], HÉCTOR AZPÚRUA*, GUSTAVO MEDEIROS FREITAS*, WILSON MIOLA*

**Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

*†Instituto Tecnológico Vale
Unidade de Mineração
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil*

Emails: jhonytavares@yahoo.com.br, aline.fidencio@gmail.com, hector.azpurua@itv.org,
gustavo.medeiros.freitas@itv.org, wilson.miola@itv.org

Abstract— The development of mining technologies has grown significantly in recent years. For mining companies, the adoption of new technologies on automation and remote operation represents a great opportunity for gains in productivity and safety. This paper describes the development of an integrated solution for autonomous navigation and manipulation that can be applied to mining processes. The proposed solution was validated with simulated and real tests; the target application is the autonomous explosive charging. This solution can reduce or eliminate the risks to which operators are exposed in environments such as rock blast areas. The tests were carried out in laboratory, using a mobile platform with a robotic arm.

Keywords— automation, robotics, autonomous navigation and manipulation

Resumo— O desenvolvimento de tecnologias aplicadas a mineração tem crescido significativamente nos últimos anos. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias em automação e operação remota representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma solução integrada para navegação e manipulação autônomas que pode ser utilizada em processos de mineração. A solução proposta é validada através de simulações e testes reais; a aplicação alvo escolhida foi o carregamento autônomo de explosivos. Essa aplicação pode reduzir e até eliminar os riscos a que os operadores estão expostos em ambientes como área de desmonte de rochas com presença de explosivos. Os testes foram realizados em laboratório, utilizando uma plataforma móvel de médio porte com um braço robótico acoplado.

Palavras-chave— automação, robótica, navegação e manipulação autônomas

1 Introdução

A criação e a difusão de novas tecnologias têm promovido um cenário de importantes mudanças no setor de mineração. Para as mineradoras, a adoção de novas tecnologias representa uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança (Mesquita et al., 2016).

A Vale possui um projeto piloto de mina autônoma em andamento na mina de Brucutu. Através da automação e operação remota, o projeto busca métodos mais eficientes e seguros de mineração. A empresa conta com caminhões autônomos, 1 perfuratriz autônoma, 1 trator teleoperado e 1 caminhão autônomo para carregamento de explosivos em fase de desenvolvimento. Além disso, a empresa possui aplicações de sistemas robóticos em construção de túneis, lavagem de caminhões, reparo de vagões e inspeção de cavidades (Mourao, 2014; DeFatoOnline, 2014).

Existem vários processos na mineração que podem ser automatizados. A prioridade é feita considerando principalmente os fatores: segurança, eficiência e padronização. Como exemplo de atividades que envolvem alto risco podem ser citadas as operações de transporte, carregamento

e detonação de explosivos relacionados ao desmonte de rochas.

O desmonte de rochas na mineração é o processo de retirada de materiais de uma estrutura vertical dentro da mina, mediante a explosão de um ou múltiplos furos, para formar plataformas horizontais. Embora existam grandes progressos nas operações com explosivos, fatalidades ainda são decorrentes, principalmente devido ao manuseio inadequado de explosivos e à segurança inadequada da área de detonação. Devido aos riscos relacionados às operações que envolvem explosivos, já existem várias pesquisas sobre equipamentos autônomos relacionadas a essas atividades, particularmente na etapa de carregamento (Bonchis et al., 2014; Young, 2002).

Este trabalho propõe um estudo prospectivo e teste de conceito para a programação de equipamentos autônomos com capacidade de navegação e manipulação de objetos. A aplicação alvo escolhida foi o carregamento de explosivos. Os testes foram realizados em laboratório utilizando uma plataforma móvel com um braço robótico acoplado.

Na próxima seção deste artigo serão apresentados os trabalhos relacionados mais relevantes no

contexto do presente trabalho para navegação e manipulação autônomas. Em seguida, a descrição do problema, solução proposta e metodologia utilizada são apresentadas na seção III. Na seção IV são mostrados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados em laboratório. Por último, na seção V são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

Existem várias aplicações de técnicas de navegação e manipulação em equipamentos autônomos, como o Hot Metal Carrier (Roberts et al., 2007). Este equipamento é capaz de navegar, desviar de obstáculos e manipular um cadinho com alumínio fundido de forma autônoma. O sistema de localização do veículo é feito por odometria, com auxílio de GPS. A detecção de obstáculos e mapeamento do ambiente é realizada via lasers planares. As operações de manipulação são divididas em pegar e soltar o cadinho. Inicialmente é realizada uma aproximação onde o cadinho pode ser detectado visualmente, e então o gancho do veículo é direcionado para segurá-lo.

No setor da mineração é possível citar o sistema robótico de carregamento de explosivos RECS (Bonchis et al., 2014). O equipamento desenvolvido consiste em um caminhão acoplado de um manipulador mecânico com 6 graus de liberdade. Para realizar o carregamento de explosivos de forma autônoma, o RECS possui um sistema de detecção de furos, processamento de imagem para auxiliar no posicionamento do efetuador, e planejamento e controle de trajetórias. A detecção de furos é feita através de um sistema de escaneamento e mapeamento baseado em lasers acoplados no efetuador. O processamento de imagens é feito por câmeras, montadas sobre o efetuador, que fornecem estimativas confiáveis da localização dos furos. O planejamento e controle de trajetórias é feito utilizando a técnica de campos potenciais.

Um exemplo relevante de aplicação de técnicas de navegação e manipulação autônomas é o robô humanoide Dynamaid, utilizado para serviços domésticos (Stückler and Behnke, 2009). A estrutura do robô é dividida em duas partes, base e corpo superior antropomórfico. A base é composta por 4 pares de rodas direcionais, com acionamento diferencial individual, que possibilitam a navegação omnidirecional. O corpo superior é composto por 2 braços antropomórficos. Dentre as diversas funcionalidades do Dynamaid, vale destacar as técnicas utilizadas para navegação, manipulação e detecção de objetos.

- Navegação: para navegar de forma autônoma o robô precisa estimar a sua posição num determinado mapa, planejar uma trajetória livre

de obstáculos, e ser capaz de mapear ambientes desconhecidos através dos seus sensores. Para estimar a posição inicial no mapa foi utilizado o algoritmo *Adaptive Monte Carlo Localization* (Fox, 2003). O planejamento de trajetória foi implementado por algoritmos de busca heurística A* (Hart et al., 1968). Por último, no mapeamento de ambientes desconhecidos foi utilizada a técnica de mapeamento e localização simultâneos (SLAM) através dos algoritmos FastSLAM (Montemerlo et al., 2003) e GMapping (Grisetti et al., 2007).

- Manipulação: para resolver de forma robusta as tarefas de manipulação móvel, foram integrados a detecção de objetos, a navegação e as primitivas de movimento. O robô pode agarrar objetos, carregá-los e entregá-los a usuários humanos. Para agarrar um objeto em uma localização específica o robô navega até uma posição próxima ao objeto, e então utiliza um sistema de lasers que detectam a posição vertical e horizontal desejada para guiar os manipuladores.

- Detecção e reconhecimento de objetos: para a detecção e localização é utilizado um laser Hokuyo. Uma vez alinhado ao plano dos objetos, o laser realiza um escaneamento horizontal para detectá-los. Segmentos com tamanhos e larguras específicos são considerados como objetos potenciais. O reconhecimento dos objetos é feito por processamento de imagens através da comparação de cores e descritores.

Exemplos mais recentes de técnicas de navegação e manipulação autônomas são encontradas nos robôs desenvolvidos para o Darpa Robotics Challenge 2015. O vencedor da competição, o DRC-HUBO, possui um sistema de detecção e localização de objetos baseado em processamento de imagens estéreo (Shim et al., 2016).

3 Metodologia

O problema abordado neste trabalho é o carregamento autônomo de explosivos, o qual consiste na inserção autônoma de explosivos em furos realizados na região de desmonte de minério. Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista e um veículo preparado para transporte dos materiais relacionados à detonação. Na região de desmonte, o operador localiza e insere uma mangueira no furo de detonação e o carregamento de explosivos é feito por uma bomba que, através da mangueira, transporta os explosivos do veículo para dentro do furo. Por último, o operador monta o detonador e insere o dispositivo de detonação no furo como observado na Figura 1 (Mendes, 2010).

Neste trabalho é proposta a emulação de um carregamento de explosivos, onde as atividades que seriam executadas pela equipe treinada são realizadas por uma plataforma móvel equipada com



Figura 1: Operador inserindo dispositivos de detonação no furo de forma manual. (Desmontec, 2012)

um braço manipulador. Assim, as atividades que a plataforma deve executar são: navegar até a região do furo e identificar a sua posição, utilizar o manipulador para inserir uma mangueira na abertura e finalmente realizar o descarregamento dos explosivos. Um diagrama da metodologia proposta em alto nível pode ser observada na Figura 2.

A solução proposta de navegação e manipulação autônomas foi validada através de testes simulados e com robô real em ambientes controlados. Para efeitos de simplificação nos testes reais, é assumido que o furo de detonação é representado por um círculo no chão. A inserção da mangueira no furo e descarregamento de explosivos são representados pelo posicionamento do efetuador do braço sobre o círculo.

3.1 Componentes do sistema

O sistema proposto usa como plataforma móvel o ‘Seekur Jr’, o qual esta equipado com um braço manipulador ‘Schunk Powerball’ (Figura 3). Para integrar e controlar o sistema via software foi utilizado o ROS (Robot Operation System), um sistema de código aberto que fornece ferramentas e aplicações para controle robôs e sensores (Joseph, 2015).

3.1.1 Plataforma Móvel

O ‘Seekur Jr’ é uma plataforma móvel utilizada em pesquisa e desenvolvimento de aplicações de robôs. A plataforma se locomove pelo método de derrapagem (*skid-steering*) através de 4 rodas fixas com acionamento diferencial feito por 2 motores reversíveis. A plataforma integra os seguintes dispositivos que auxiliam na autonomia do robô:

- Laser range finder SICK LMS-111;
- Câmera PTZ RVision SEE;
- Câmera estéreo MobileRanger C3D;
- Unidade de Medição Inercial;
- GPS AgGPS 372;
- Roteador sem fio WRAP;
- Sensores de toque (bumpers).

O ‘Seekur Jr’ possui uma arquitetura em duas camadas, composta por um microcontrolador e um computador embarcados. O microcontrolador opera o firmware ‘SeekurOS’ que funciona como uma interface para a comunicação com os dispositivos da plataforma. O computador opera com o sistema operacional ‘Ubuntu 12.04’ e utiliza softwares que enviam comandos para os dispositivos do robô através da interface ‘SeekurOS’.

3.1.2 Braço Manipulador

O ‘Schunk Powerball’ LWA 4P é um braço robótico de 6 graus de liberdade. O dispositivo é constituído por três juntas compactas denominadas módulos ERB que integram dois eixos perpendiculares juntamente com seus circuitos de controle e acionamento. O manipulador possui um posicionamento preciso devido a utilização de reduções *harmonic drive* (sem folga), tornando-o ideal para tarefas robóticas de alta precisão (Memar and Esfahani, 2015). O braço é equipado com um efetuador de 1 grau de liberdade e um sensor de força e torque FTM 75.

3.2 Método proposto

A solução proposta para o problema de carregamento autônomo de explosivos pode ser dividida em três grande etapas: (i) Navegação autônoma (ii) Processamento de imagens para detecção do furo e (iii) Manipulação do braço robótico (Figura 2b).

A comunicação e controle do sistema foram feitos via ROS através de pacotes adaptados para o Seekur Jr. Cada pacote possui uma funcionalidade específica no sistema. O processamento de dados do sistema foi dividido em duas máquinas, um computador embarcado e outro externo.

3.2.1 Navegação Autônoma

A navegação autônoma foi utilizada para levar a plataforma até a região do furo. Para realizar essa tarefa, o sistema precisa mapear o ambiente, traçar uma rota até as coordenadas do furo e executar a trajetória desviando de obstáculos. Essa atividade foi realizada através de um conjunto de pacotes do ROS (*Navigation Stack*) que juntos planejam e controlam a trajetória do robô ¹.

Os principais pacotes utilizados foram:

- *p2os_driver*: driver para acionamento dos motores da plataforma móvel através de comandos de velocidade (/cmd_vel). Disponibiliza interface para teleoperação através de teclado ou *joystick*.
- *lms1xx*: lê os valores de ângulo e distância fornecidos pelo laser e publica no tópico /LaserScan.

¹O *stack* é descrito em http://wiki.ros.org/move_base.

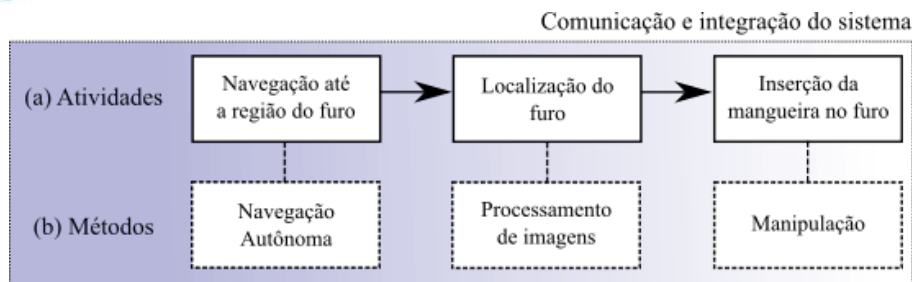


Figura 2: Diagrama de alto nível da metodologia proposta: (a) Descrição das atividades executadas no teste de conceito e (b) métodos aplicados para realizar as atividades associadas.



Figura 3: Robô usado como base da implementação: ‘Seekur Jr’, equipado com braço manipulador ‘Schunk Powerball’.

- *gmapping*: utiliza o método SLAM para mapear o ambiente e localizar o ‘Seekur Jr’ no mapa (/map).
- *move_base*: planeja e controla trajetórias para navegação autônoma com desvio de obstáculos.

Usando o mapa gerado pelo pacote *Gmapping*, o *move_base* cria uma trajetória para a plataforma se locomover entre um ponto inicial e final com desvio de obstáculos. O pacote utiliza um planejador global e local para realizar sua tarefa de navegação.

A trajetória do ponto inicial ao final é feita pelo planejador global que se baseia no algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959). O algoritmo busca a rota com o menor custo entre dois vértices dentro de um grafo. Uma vez escolhido o vértice inicial, o algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo.

A trajetória global é utilizada como referência para planejar as trajetórias locais com desvio de obstáculos. O planejador local se baseia no algoritmo *Trajectory Rollout* que se comporta de acordo com os passos a seguir:

1. Realiza amostragem discreta de velocidades (d_x, d_θ) no espaço de controle da plataforma;
2. Para cada velocidade amostrada, realiza a simulação de avanço a partir do estado atual da plataforma para prever o que aconteceria se a

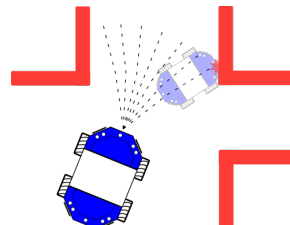


Figura 4: Simulação de avanço das velocidades amostradas.

velocidade amostrada fosse aplicada durante algum período de tempo (Figura 4);

3. Avalia (pontua) cada trajetória resultante da simulação direta, utilizando uma métrica que incorpora características como: proximidade de obstáculos, proximidade do ponto final, proximidade da trajetória global e velocidade da plataforma. Descarta as trajetórias que colidem com obstáculos;
4. Escolhe a trajetória de maior pontuação e envia a velocidade associada para a plataforma móvel;

As velocidade linear (d_x) e de rotação (d_θ) são publicadas no tópico ‘/cmd_vel’ e então enviadas para o robô através do pacote *p2os_driver*.

3.2.2 Detecção do furo

O processamento digital de imagens foi utilizado para localizar a posição do furo com respeito à plataforma. Para isso, o sistema precisa identificar formas circulares ou elípticas e calcular a que distância elas se localizam com respeito ao sistema de coordenadas da plataforma.

Essa tarefa foi feita a partir das imagens obtidas pela câmera estéreo acoplada no robô (MobileRanger C3D). O software de processamento das imagens do par estéreo é constituído por um driver que utiliza a biblioteca *OpenCV* para calcular o mapa de disparidade e fornecer as imagens RGB das câmeras. Na imagem RGB é aplicado um algoritmo de detecção de círculos e elipses; o algoritmo se baseia em uma estratégia de seleção de arcos candidatos para formar elipses e no uso de transformadas Hough (Fornaciari et al., 2014). A imagem com disparidade é utilizada para calcular a distância dos pontos da imagem onde um círculo ou elipse foi detectado.

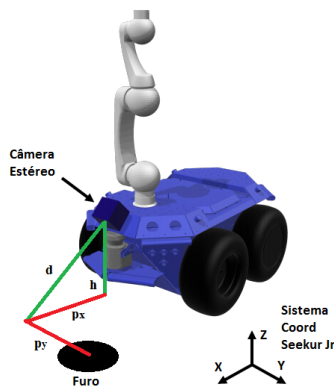


Figura 5: Posição (p_x, p_y) do furo com respeito ao sistemas de coordenadas do robô.

Quando a câmera estéreo detecta um círculo ou elipse, é estimado mediante uma média móvel de 5 valores o centroide da elipse e a distância desse centroide até a câmera pelo mapa de disparidade. A média móvel é usada para minimizar o erro proveniente de ruído ao estimar a posição real do furo; a quantidade de amostras da média foi obtida empiricamente mediante tentativa e erro. Estes valores, juntamente com a altura do laser com relação ao furo, são utilizados para calcular a posição deste com respeito ao sistema de coordenadas do robô, conforme a Figura 5.

O eixo Y do sistema de coordenadas do robô possui origem no centro da plataforma, onde está localizada a câmera estéreo. Para conhecer a posição do centro do furo observado no mapa de disparidade (p_y) , com respeito ao eixo Y do robô, foi aplicada uma técnica de interpolação linear. Foram amostradas coordenadas do mapa de disparidade e comparadas manualmente com a medida de distância real até origem do eixo Y do robô. Finalmente as distâncias reais foram interpoladas e são usadas como referência para os algoritmos de planejamento.

A posição do furo no eixo X (p_x) é calculada através da relação de um triângulo retângulo $p_x = \sqrt{d^2 - h^2}$, onde h é altura do laser no eixo Z e d é a distancia do furo calculada pela câmera.

3.2.3 Planejamento e controle do braço manipulador

O braço manipulador foi usado para emular a inserção da mangueira no furo onde são carregados os explosivos. A emulação da atividade consiste em receber as coordenadas do furo e finalmente planejar e executar uma trajetória até essa locação de forma que o efetuador esteja orientado na direção vertical apontando para baixo. Para realizar essa atividade foram utilizados os seguintes pacotes:

- *schunk robotics*: driver e controlador do braço *Schunk*. O controlador atua no espaço das juntas utilizando interpolação pelo método *spline*.

- *moveit*: planeja trajetória com desvio de obstáculos e envia para o controlador do braço *Schunk*. Fornece interface gráfica e uma variedade de algoritmos de planejamento de trajetória com desvio de obstáculos.

- *seekurjr_description*: descreve o 'Seekur Jr' no formato URDF (Unified Robot Description Format).

O planejamento de trajetória é realizado pelo *MoveIt!*, o qual gera uma sequência de pontos que o manipulador deve seguir. O algoritmo utilizado foi o *Rapidly Exploring Random Tree* (RRT) (Kuffner and RRT-Connect, 2000). O RRT busca uma trajetória entre dois pontos, dentro de uma árvore de configurações do braço, que não colida com obstáculos. A árvore é construída através da adição de pontos aleatórios que pertencem ao espaço de configurações e satisfazem as restrições do manipulador (Algoritmo 1).

Algoritmo 1 - Rapidly Exp. Random Tree

```

1: função GERAR_RRT( $x_{inic}, K, \Delta T$ )
2:   para k=1 até K faça
3:      $x_{aleat} \leftarrow Config\_Aleatoria()$ 
4:      $x_{prox} \leftarrow Vizinh\_mais\_prox(x_{aleat}, \mathcal{T})$ 
5:      $u \leftarrow Selec\_Entrada(x_{aleat}, x_{prox})$ 
6:      $x_{novo} \leftarrow Novo\_Estado(x_{prox}, u, \Delta T)$ 
7:      $\mathcal{T}.adic\_vertice(x_{novo})$ 
8:      $\mathcal{T}.adic\_aresta(x_{novo}, x_{prox}, u)$ 
9:   fim para
10:  devolve  $\mathcal{T}$ 
11: fim função

```

A trajetória gerada é enviada para o controlador do manipulador. O controlador utiliza o método *spline* para interpolar os pontos e executar a trajetória. O pacote *seekurjr_description* é utilizado para a construção da matriz de conflitos do *MoveIt!*. Através do modelo 3D do robô, é calculada a trajetória para o manipulador de forma que ele não atinja a sua própria estrutura ou a plataforma.

3.2.4 Integração do Sistema

Para executar tarefas de navegação e manipulação de forma totalmente autônoma, os sistemas de navegação, processamento de imagens e manipulação foram integrados para funcionar conjuntamente.

Os processos de navegação e processamento de imagens são iniciados simultaneamente, porém, a manipulação é acionada somente depois que o robô atinge o ponto final de navegação desejado. A partir deste momento, a posição do círculo ou elipse detectada no processamento de imagens é considerada como a posição final desejada para o efetuador do braço *Schunk*. Assim, utilizando uma interface com o *MoveIt!*, o sistema calcula

a cinemática inversa da posição desejada e busca trajetórias para o manipulador utilizando o algoritmo RRT. Ao encontrar uma trajetória, o braço inicia o movimento e se posiciona com o efetuador sobre o círculo ou elipse detectado.

4 Resultados

A validação da solução integrada de navegação e manipulação autônomas foi feita através experimentos reais e simulados de carregamento de explosivos. O teste real foi feito num ambiente controlado onde o furo de detonação é simulado por um círculo no chão. Os resultados podem ser divididos em 3 etapas conforme o diagrama de blocos da atividade apresentados na Figura 2a. Dado o ponto do furo no mapa, o robô navega até o mesmo desviando de obstáculos no caminho e então utiliza o processamento de imagens para posicionar o braço manipulador sobre o furo detectado².

4.1 Navegação até o furo

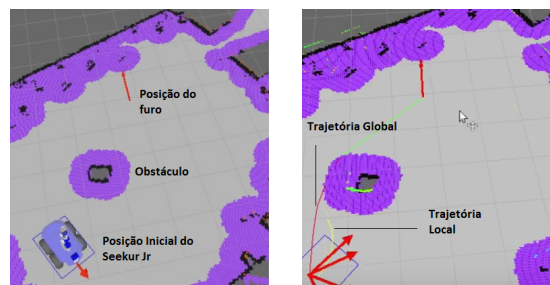
Antes de iniciar os testes foi realizado um mapeamento do laboratório usando o laser planar equipado no robô (Laser modelo *Sick*). Uma vez que o ambiente foi mapeado, o sistema recebe a posição aproximada do furo no mapa de forma manual (Figura 6a). Então, é iniciado o processo de planejamento de trajetórias onde são criadas trajetórias global e local. Conforme a Figura 6b, a trajetória global considera os obstáculos detectados anteriormente no mapa e termina na posição do furo, enquanto a trajetória local busca seguir a trajetória global e ao mesmo tempo desviar de qualquer obstáculo que possa aparecer durante a navegação até o furo. A trajetória completa executada pelo robô, desviando do obstáculo até atingir o furo, pode ser visualizada na Figura 6c.

4.2 Localização do furo

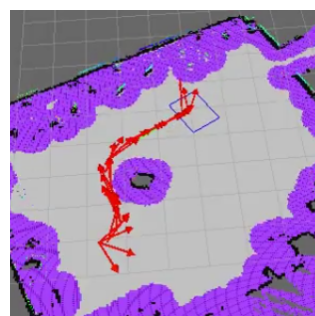
A localização do furo é realizada através de processamento de imagens. Quando o robô se aproxima do furo, as coordenadas da imagem (em pixels) e a distância do furo (em centímetros) são utilizadas para calcular a posição do furo com respeito ao sistema de coordenadas do robô (Figura 7).

4.3 Posicionamento do manipulador sobre o furo

O manipulador, *Schunk* LWA4P, opera somente após a conclusão da trajetória de navegação. O manipulador recebe as coordenadas da localização do furo calculadas através do processamento das imagens da câmera estéreo. Em seguida, é gerada a cinemática inversa para que o efetuador esteja na posição do furo com orientação voltada para



(a) Mapeamento em ambiente controlado: posição do robô e do furo de detonação. (b) Planejamento de trajetórias: global e local.



(c) Trajetória executada pelo robô para atingir o furo.

Figura 6: Etapas da navegação no experimento real em ambiente controlado.

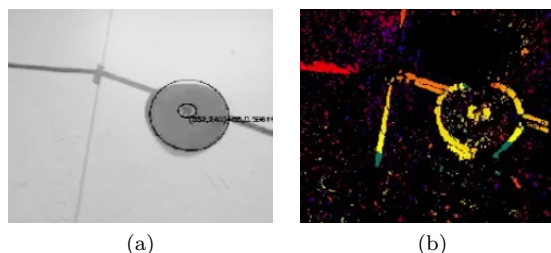


Figura 7: Imagens da câmera estéreo: (a) Localização do furo usando detecção de elipses e (b) mapa de disparidade da cena.

baixo. Uma vez que a posição final foi estimada, é iniciado o planejamento e execução da trajetória utilizando o algoritmo RRT. O processo de posicionamento do manipulador pode ser observado na Figura 8.

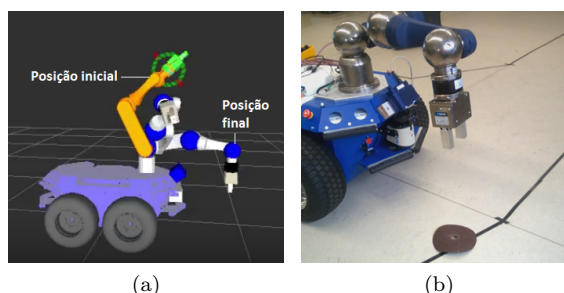


Figura 8: Posicionamento do manipulador sobre o furo: (a) simulação de trajetória no ROS e (b) movimento real.

²A demonstração prática deste teste trabalho pode ser visualizada no link <http://www.youtube.com/watch?v=a9Wdf0BJ7X4>.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste artigo foi apresentado um estudo prospectivo com experimentos reais para a programação de equipamentos autônomos com capacidade de navegação e manipulação de objetos. O caso de uso abordado neste trabalho foi o carregamento de explosivos para furos de detonação na mineração. Esta tarefa foi realizada usando uma plataforma robótica móvel comercial equipada com um braço manipulador e sensores como laser planar, unidade de medição inercial e câmera estéreo.

A proposta desenvolvida neste trabalho envolveu o uso extensivo da plataforma ROS (Robot Operating System) para executar as atividades de navegação e manipulação autônomas. O ROS possibilitou a comunicação e controle dos dispositivos de forma paralela e distribuída; o que facilitou na organização e processamento de dados. Para a tarefa de navegação autônoma foram utilizadas as técnicas SLAM e *Trajectory Rollout*. Através do SLAM foi possível mapear o ambiente e localizar a posição da plataforma simultaneamente. O planejamento e execução de trajetórias com desvio de obstáculos foi realizado com a técnica de *Trajectory Rollout*.

A manipulação utiliza inicialmente a câmera estéreo com a finalidade de reconhecer padrões e indicar o ponto objetivo para o manipulador. Com o ponto objetivo calculado, o algoritmo RRT cria pontos intermediários que permitem traçar uma trajetória para o manipulador.

Os sistemas de navegação, processamento de imagens e manipulação foram integrados em um sistema único. A solução integrada foi validada com sucesso através do teste de conceito proposto.

Em trabalhos futuros serão realizados testes em ambientes externos, usando furos reais de detonação. Futuramente o método proposto será estendido para procurar as melhores rotas em ambientes não estruturados, evitando obstáculos e localizando os furos previamente definidos via coordenadas de GPS ou similar. Futuras extensões deste trabalho também envolvem o uso de sensores 3D mais acurados para detecção do furo e diferentes tipos de manipuladores.

6 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e Vale S.A.

Referências

Bonchis, A., Duff, E., Roberts, J. and Bosse, M. (2014). Robotic explosive charging in mining and construction applications, *IEEE T-ASE* **11**(1): 245–250.

- DeFatoOnline (2014). Perfuratriz autônoma, em teste na mina brucutu, trabalha sem operador na cabine, <https://goo.gl/oo60Ir>. (Acessado 11/01/2017).
- Desmontec (2012). Colocação de explosivos manuais para desmonte de rocha, <https://goo.gl/mCmjkb>. (Acessado 01/04/2017).
- Dijkstra, W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische mathematik*.
- Fornaciari, M., Prati, A. and Cucchiara, R. (2014). A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications, *Pattern Recognition* **47**(11): 3693–3708.
- Fox, D. (2003). Adapting the sample size in particle filters through kld-sampling, *The international Journal of robotics research* **22**(12): 985–1003.
- Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W. (2007). Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters, *IEEE transactions on Robotics* **23**(1): 34–46.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics* **4**(2): 100–107.
- Joseph, L. (2015). *Mastering ROS for robotics programming*, Packt.
- Kuffner, J. and RRT-Connect, S. L. (2000). An efficient approach to single-query path planning iee international conference on robotics and automation, *San Francisco* pp. 473–479.
- Memar, A. H. and Esfahani, E. T. (2015). Modeling and dynamic parameter identification of the schunk powerball robotic arm, *ASME 2015*, ASME, pp. V05CT08A024–V05CT08A024.
- Mendes, M. L. (2010). *Curso de desmonte de rochas por explosivos*, Rio Grande Consult. e Serv. em Mineracao.
- Mesquita, P., Carvalho, P. and Ogando, L. (2016). Desenvolvimento e inovação em mineração e metais, *BNDES Setorial, Rio de Janeiro* (43).
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D. and Wegbreit, B. (2003). Fastslam 2.0: An improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges, *IJCAI* **16**.
- Mourao, J. (2014). Noticias mineracao - vale usa robôs na construção de túneis do projeto s11d, <https://goo.gl/DERNQK>. (Acessado 11/01/2017).
- Roberts, J., Tews, A., Pradalier, C. and Usher, K. (2007). Autonomous hot metal carrier navigation and manipulation with a 20 ton industrial vehicle, *2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, IEEE, pp. 2770–2771.
- Shim, I., Shin, S., Bok, Y., Joo, K., Choi, D.-G., Lee, J.-Y., Park, J., Oh, J.-H. and Kweon, I. S. (2016). Vision system and depth processing for drc-hubo, *ICRA 2016*, IEEE, pp. 2456–2463.
- Stückler, J. and Behnke, S. (2009). Integrating indoor mobility, object manipulation, and intuitive interaction for domestic service tasks, *9th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*.
- Young, A. (2002). Project designed to reduce risk to miners, *Engineering Dimensions* **23**(2): 20–21.

Chapter 13

ABWEEK 2017

18º Simpósio de Mineração

Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração ISSN 2594-357X vol. 47, num. 2 (2017)



359

ROBÓTICA NA MINERAÇÃO

Eduardo Cota¹
Marcos Paulo Torre¹
Jhony Alan Tavares Ferreira¹
Aline Xavier Fidêncio¹
Guilherme Brito Rodrigues²
Filipe Augusto Santos Rocha³
Héctor Azpúrua⁴
Gustavo Medeiros Freitas⁵
Wilson Miola⁶

Resumo

Graças à miniaturização e aumento na robustez de equipamentos eletrônicos, a robótica tem estendido as suas aplicações até às mais diversas áreas. Atualmente a mineração possui muitos desafios a serem resolvidos com soluções tecnológicas autônomas ou teleoperadas. Este trabalho aborda a descrição de algumas das técnicas e projetos do estado da arte da robótica que estão sendo aplicados em ambientes de mineração no Brasil e no mundo.

Palavras-chave: Robótica; Teleoperação; Automação; Mineração

MINING ROBOTICS

Abstract

Thanks to the miniaturization and robustness increase of electronic equipment, robotics has extended its applications to the most diverse areas. Today, mining has many challenges to be solved with technological solutions. This work addresses some of the state of the art robotics techniques and projects currently being applied in mining environments in Brazil and worldwide.

Keywords: Robotics; Tele-operation; Automation; Mining

¹ Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Mestrando(a), Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Mestre em Ciências da Computação, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Doutor em Engenharia Elétrica, Pesquisador assistente, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁶ Doutor em Engenharia de Minas, Pesquisador titular, Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade tradicional no Brasil, mas possui riscos para operadores humanos. Dado o grande número de tarefas repetitivas e perigosas, a mineração possui um enorme escopo para aplicações robóticas. Operações mineradoras requerem o manuseio de enormes quantidades de material de forma economicamente viável e segura. Altos custos operacionais, a necessidade de grande produtividade e melhores resultados de saúde e segurança impulsionam ainda mais o uso de robôs. As abordagens existentes para otimizar produtividade e segurança através de treinamento, práticas de trabalho e design de máquinas maiores têm retornado cada vez menos os investimentos aplicados. A indústria se aproxima de uma nova era, na qual robôs e automação irão ditar o futuro em termos de produtividade e segurança (Siciliano et al. [1]).

Apesar do enorme potencial, o emprego de dispositivos robóticos especializados em atividades que envolvam mineração ainda resulta em poucas aplicações práticas e de sucesso. Isso se deve ao fato de que as condições de operação oferecem aos equipamentos grandes dificuldades e riscos - tais como: altas temperaturas; excesso de umidade; poeira; solo irregular; exposição a riscos de queda e desabamento - que elevam os gastos de desenvolvimento, execução e manutenção. Além disso, considerando que a análise dos recursos de uma mina, que determina a sua rentabilidade, é um cálculo que pode variar, a introdução de novas tecnologias poderia oferecer riscos aos lucros da mineradora.

Mesmo diante das dificuldades encontradas, o aumento da necessidade de se produzir mais e da inaceitabilidade de acidentes humanos e danos ambientais, faz com que, atualmente, o investimento seja indispensável. Na literatura são sinalizados aumentos significativos de produção e segurança aplicando-se técnicas de automação. Por exemplo, tem se observado o aumento em 20% na produtividade através da automação aplicada a pás carregadeiras de minas subterrâneas (Load Haul Dump), e em outro caso, a automação de veículos carregadores efetivamente reduz custos de manutenção e aumenta continuidade de produção (Siciliano et al. [1]). Quase uma década depois, (Siciliano et al. [2]) salienta que as companhias mineradoras atuais têm renovado esforços em abordagens inovativas como solução para exploração de recursos naturais.

No Laboratório de Controle e Robótica do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto-MG, são desenvolvidos projetos visando satisfazer as necessidades atuais de atividades mineradoras realizadas pela VALE. Neste artigo será abordado o estado da arte da robótica na mineração e serão detalhados alguns dos trabalhos de robótica aplicada na mineração realizados no laboratório.

O restante do texto se encontra dividido em: Seção 2, na qual serão descritos alguns dos trabalhos de robótica mais relevantes na área de mineração; Seção 3, são detalhados alguns dos trabalhos relevantes desenvolvidos dentro do Brasil; Seção 4, onde são descritos os projetos robóticos realizados no Instituto Tecnológico da Vale (ITV); e finalmente Seção 5, onde são mostradas as considerações finais e ideias futuras.

2 ESTADO DA ARTE

No trabalho de Singh [3], o estado da arte da automação aplicada a equipamentos relacionados à mineração, como: tratores, escavadeiras e carregadeiras, era apontada apenas como uma tendência. Duas décadas depois, a tendência se confirma e as aplicações de automação e robótica na mineração se fazem cada vez mais necessárias para empresas que querem atingir metas em um mercado globalizado.

Saúde e segurança é um tema recorrente no ramo da mineração. Mesmo que o número de fatalidades tenha sido reduzido consideravelmente, segundo o MSHA [4], somente em 2016, 25 pessoas morreram em atividades mineradoras nos EUA. O ambiente de mineração sempre oferecerá riscos ao homem, mas as atividades de exploração precisam continuar para suprir as necessidades das indústrias de todo o mundo. Uma maneira óbvia de garantir que não haverá danos ao homem é retirar todo o contingente humano das áreas de operações perigosas. Com este intuito, muitos investimentos em atividades teleoperadas e autônomas têm sido realizados.

2.1 Teleoperação

Na mineração, é muito comum a utilização de explosivos para o desmonte de rochas. Este procedimento é necessário para que a rocha seja fragmentada em tamanhos que seja possível o carregamento e transporte com os atuais equipamentos. Após o processo de desmonte, porém, permanecem alguns fragmentos com tamanhos não desejáveis. Visando corrigir este problema, Duff et al. [5] desenvolveram um sistema robótico teleoperado para quebrar estes fragmentos em tamanhos menores para adequá-los ao processo de transporte.

O objetivo do trabalho é demonstrar a viabilidade da implementação de um sistema de controle aplicado a longas distâncias considerando efetividade e segurança. Além de não expor o operador do equipamento ao ambiente hostil de operação, a teleoperação pode causar aumento da produtividade pelo não deslocamento do mesmo até o local de fragmentação de rocha. Inserir o operador neste local de forma virtual é um desafio pela limitação dos sensores e câmeras. Como o máximo de informações auxilia em uma melhor tomada de decisão, utilizou-se uma abordagem híbrida que envolve o uso de visualização direta através de câmeras e visualização sintética através do uso de sensores e computação gráfica. Os testes realizados apresentaram resultados positivos. Com apenas meia hora de interação com o sistema de controle, o operador foi capaz de quebrar pedaços de rocha a quilômetros de distância. Apesar do sucesso, algumas considerações foram registradas em relação à dificuldade de operar com grandes fragmentos; a problemas de concentração devido ao alto número de telas e às limitações da representação do ambiente real.

O processo de carregamento de explosivos pode ser caracterizado como perigoso simplesmente pela potencial destruição causada pelos mesmos. Tendo como objetivo a minimização dos riscos e dificuldades desta atividade, Bonchis et al. [6] desenvolveram e testaram um sistema robótico para a execução do carregamento de explosivos. O dispositivo possui sistema de detecção de furos, onde são carregados os explosivos; e opção de posicionamento do braço automático ou teleoperado. Devido às limitações das funções automáticas, a opção

teleoperada se faz necessária.

De acordo com Hayashi et al. [7], a performance da teleoperação é limitada em relação à operação direta, por razão da perda de consciência e sensibilidade causada pelo ambiente remoto. Para tentar compensar essa lacuna, foi proposto o desenvolvimento de um *feedback* tátil para a teleoperação de uma escavadeira. Neste sentido, foi desenvolvida a função de vibração do controle à medida que a pá do equipamento se aproxima do chão. Dessa forma, a falta de sensibilidade causada pela ausência de sentidos do ambiente real é diminuída com informações adicionais da posição do equipamento.

2.2 Operação autônoma

A evolução dos sistemas teleoperados seriam os sistemas autônomos. A grande diferença é dada pelo fato de que um sistema considerado autônomo é preparado para tomar decisões sem a necessidade da intervenção humana. Ou seja, o sistema possui percepção e é equipado com atributos suficientes para realizar uma decisão de acordo com as informações adquiridas. Segundo Larsson et al. [8], apesar do enorme potencial para se aumentar produtividade e segurança, os sistemas completamente autônomos nem sempre são aplicáveis ou economicamente viáveis. Considerando isso, foi implementado um sistema de autonomia local (aplicada apenas na fase de transporte) em um equipamento teleoperado, utilizado para carregamento e transporte de minério e estéril em minas subterrâneas.

A ideia de se aplicar autonomia local tem como intenção o aumento da velocidade de transporte, visando uma maior produtividade; a redução da latência, visto que menos comandos de controle seriam enviados; e a diminuição de colisões devido à diminuição da carga cognitiva sobre o operador, o que reduz custos de manutenção. A avaliação da eficiência do trabalho foi feita por meio da medição o tempo gasto para a locomoção do equipamento e a contagem do número de incidentes ocorridos durante a locomoção, com e sem o uso das novas implementações.

Os resultados se mostraram positivos e nenhum dos incidentes ocorridos foi registrado durante locomoção por autonomia local. Além da segurança ocasionada, a autonomia resultou em tempos menores de operação (para locomoção reta), inclusive se comparado à operação na qual o operador está embarcado. Dessa forma, a autonomia, apesar de local - aplicada somente na fase de transporte, se mostrou uma alternativa clara para o aumento de produtividade, segurança e a redução de custos para o transporte de materiais em minas subterrâneas.

Outro exemplo de sucesso da aplicação de autonomia em atividades mineradoras é apresentado por Jordan [9]. Caminhões com capacidade de 330 toneladas, usados para transporte de estéril e minério no deserto mais seco do mundo - o Atacama, no Chile - operam de forma autônoma sem qualquer intervenção humana durante a locomoção do equipamento. Bellamy et al. [10] apresentam uma avaliação da utilização de veículos semelhantes em minas na Austrália. Em um comparativo realizado, é mostrada a diferença de ociosidade de um equipamento autônomo e operado: o veículo autônomo opera o equivalente a 22 dias a mais por ano que o operado. Dessa forma, é nítido o aumento da produtividade e a redução de custos atingida. Os autores ainda destacam que minas anteriormente definidas como economicamente inviáveis poderão ser reativadas

com os recursos financeiros economizados com o uso de veículos autônomos.

De acordo com Henderson et al. [11], a empresa Rio Tinto já utiliza uma frota de caminhões inteiramente autônomos no oeste da Austrália. Segundo Rio Tinto Media [12], a frota de caminhões autônomos já moveu 300 milhões de toneladas em Pilbara, Austrália. Com uma frota de 53 veículos autônomos percorreu-se quase quatro milhões de quilômetros em Yandicoogina, Nammuldi e Hope Downs 4, também na Austrália.

3 MINERAÇÃO E ROBÓTICA NO BRASIL

O Brasil possui algumas das maiores reservas de minérios do mundo e dispõe de uma indústria de mineração muito ativa. A mineração é vista como uma das indústrias mais maduras da região, mas devido ao grande custo operacional e humano envolvido na adaptação de tecnologias de automação e robótica dentro da mina ou porto, o Brasil ainda se encontra explorando o que as novas tecnologias podem acrescentar nos processos tradicionais de extração, processamento, inspeção, e monitoramento. Para as mineradoras, novas tecnologias representam uma grande oportunidade para ganhos em produtividade e segurança Mesquita et al. [13].

No Brasil, a empresa Vale já utiliza diferentes robôs em suas operações, que visam padronizar e aumentar a eficiência dos processos, assim como reduzir custos e riscos para seus empregados. Os sistemas robóticos são usados na montagem, manutenção e limpeza de equipamentos de mineração, além da preparação e manipulação de amostras durante ensaios laboratoriais.

Esses dispositivos estão presentes, por exemplo, na limpeza de caminhões fora de estrada (Figura 1 (a)). São veículos com altura de um prédio de dois andares e um tanque que comporta 4,5 mil litros de óleo diesel. As dimensões de um gigante como este tornam a limpeza manual uma tarefa perigosa para os empregados. O lavador de caminhões de Carajás emprega dois robôs industriais, um em cada lateral do lavador, que se locomovem por até 19 metros de trilhos e alcançam 4,5 metros de altura, movimentando-se conforme a programação definida. Com a tecnologia e a padronização, o serviço ganhou em produtividade e, ao mesmo tempo, reduziu impactos ambientais. Cerca de 80% da água é reutilizada no processo.

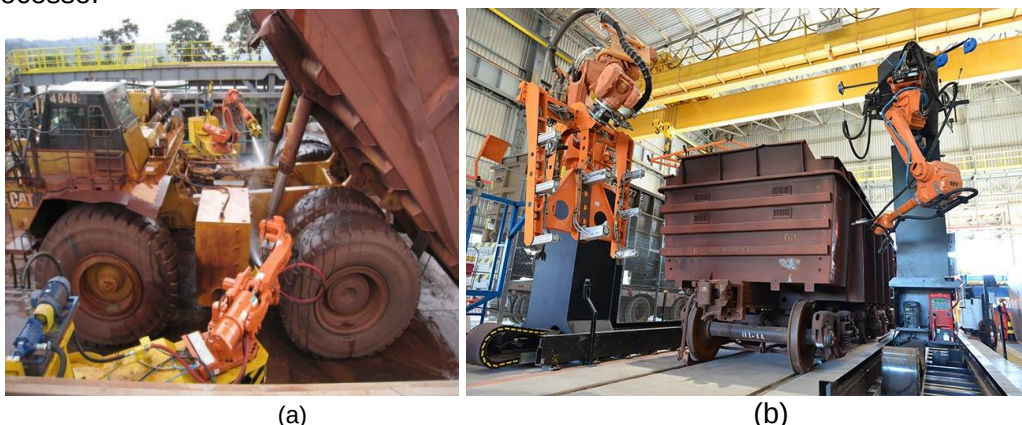


Figura 1 - Automação na mina: (a) Lavador de camiões robotizado e (b) recomposição de chapas de vagões.

Outro exemplo da utilização de sistemas robóticos na Vale é o da recomposição de chapas de vagões que circulam na Estrada de Ferro Carajás (EFC) (Figura 1 (b)). Como na linha de montagem da indústria automobilística, o sistema usado na EFC é composto de braços mecânicos capazes de realizar o corte e a solda de placas de aço carbono presentes na lateral dos vagões. Na fase manual da atividade, a troca de chapas de apenas um vagão era realizada em 48 horas. Com o robô, é possível fazer a manutenção de dois vagões em 22 horas.

Na oficina mecânica de pelletização em Vitória, um braço robótico realiza o serviço de montagem de barras de grelha. Cada carro de grelha é formado por 360 barras, cada uma pesando cinco quilos. O emprego do robô no serviço mais pesado resultou na redução imediata de 20% a mão de obra nessa atividade, permitindo aos empregados se dedicarem a outras atividades relacionadas à manutenção. Com isso, a média diária de manutenção dos carros de grelha dobrou. Na usina de pelletização 8, também em Vitória, um robô é usado no controle de amostragem das pelotas. Com este equipamento, foi possível aumentar a segurança operacional, reduzir a quantidade de equipamentos envolvidos no processo e diminuir a movimentação do material até a área de testes.

Em Carajás (PA), o Laboratório de Preparação e Ensaios Físicos também possui uma célula robótica capaz de realizar testes para determinação da granulometria do minério de ferro com mais segurança e confiabilidade. Basta o técnico alimentar o robô com o minério e programar o ensaio para que o equipamento selecione a peneira, realize as pesagens, peneiramento e envie os dados consolidados para um banco de dados. Já o laboratório de Itabira (MG) consiste num sistema composto por quatro células robotizadas, onde são preparadas e manipuladas amostras prensadas e fundidas para análises químicas de mineração. Esta robotização melhorou as condições de segurança e produtividade das análises. No Laboratório de Ensaios Físicos de Vargem Grande (MG), um robô manipula amostras de minérios entre esteiras, pulverizadores, britador e estufa. O sistema robótico é utilizado para aumentar a padronização e eficiência do processo.

4 DESENVOLVIMENTOS DO INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE

Esta seção descreve algumas das tecnologias e trabalhos de robótica mais relevantes sendo desenvolvidos atualmente no Instituto Tecnológico Vale, os quais são diretamente aplicados como soluções de mineração.

4.1 Atividades com manipuladores robóticos

A maioria dos robôs industriais utilizam *softwares* proprietários e controladores nativos, de arquitetura fechada, fazendo com que a integração com dispositivos de fabricantes diferentes, algoritmos e sensores se torne uma tarefa difícil de ser feita diretamente. Segundo Bartolomeu et al. [14], um dos grandes desafios da robótica é justamente como integrar as informações vindas de todos estes algoritmos e sensores, de modo a gerar comandos e controlar os diferentes dispositivos de atuação do robô, garantindo que a tarefa seja executada de modo correto e sem colocar em risco tanto o robô quanto aqueles que o cercam.

Uma possível solução para o problema de integração é a implementação do controle dos equipamentos à partir de um sistema unificado, possibilitando tomadas de decisão mais adequadas e cruzamento de informações. Além disso, um sistema unificado permite dar mais flexibilidade à aplicação, pois diversos tipos diferentes de algoritmos para interagir com o sistema podem ser aplicados de maneira mais simples, como de otimização, tratamento de imagens e visão computacional.

Desta forma, foi introduzida a utilização do sistema ROS, uma ferramenta flexível para implementação de *softwares* para robôs, apresentando uma coleção de ferramentas, bibliotecas e convenções, geralmente escritas nas linguagens de programação C++ ou Python (ROS [15]). O manipulador robótico utilizado para a prova de conceito foi o IRB 120 da ABB, cujo controlador é o IRC5 Compact. Ele utiliza a mesma linguagem de programação dos braços robóticos de grande escala presentes atualmente na Vale. Dessa forma, toda modificação realizada pode ser transferida de igual maneira para os sistemas robóticos que estão em operação.

O desenvolvimento deste projeto consiste em controlar totalmente o braço robótico através do ROS, utilizando uma ferramenta para planejamento de trajetórias chamada MoveIt!. O robô pode ser posicionado através de uma interface gráfica interativa, onde é possível definir pontos dentro do espaço de trabalho do robô e a melhor trajetória entre o ponto inicial e final é calculada. Outra funcionalidade que pode ser desenvolvida através desta integração é o desvio de obstáculos. Na Figura 2 é mostrado um objeto verde incorporado à cena e o caminho feito pelo manipulador para evitar a colisão com o objeto. O próprio *software* identifica a colisão com o obstáculo e calcula a melhor trajetória para que o desvio ocorra.

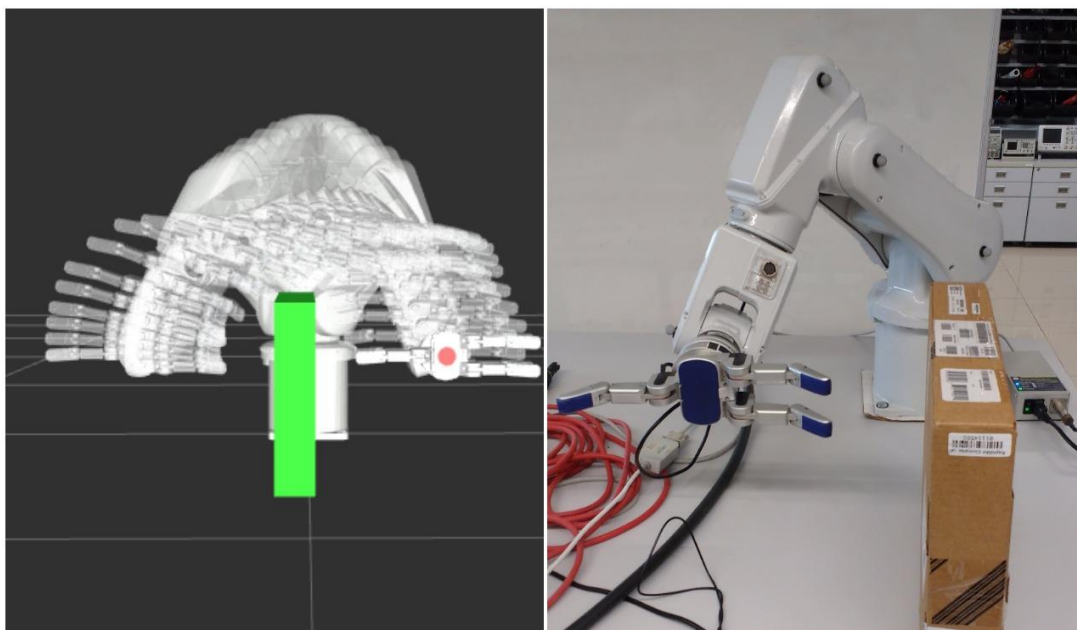


Figura 2 - Trajetória planejada com desvio de obstáculo e pose final executada pelo robô real.

O método abordado apresenta grande flexibilidade e robustez, devido ao sistema ser centralizado no *framework* ROS. Apesar de sua flexibilidade, este método exige uma grande reformulação no sistema da célula robótica que receberá a aplicação. Para projetos de novas plantas, seu uso deve ser considerado, pois

facilitará, no futuro, a integração com novos dispositivos e sistemas.

4.2 Robô de exploração de cavidades

É recorrente nas áreas de exploração mineral o descobrimento de cavidades naturais. Por questões legais e ambientais, não é permitido explorar economicamente estas áreas sem antes haver catalogação do ambiente. A investigação então é crucial para viabilizar a extração mineral em regiões onde há cavidades. Os espeleólogos são os cientistas especializados em realizar estas explorações, entretanto, cavidades naturais podem ser ambientes hostis e perigosos.

Com iniciativa da área de espeleologia da Vale, e tendo em vista a segurança dos colaboradores, está sendo desenvolvido no Instituto Tecnológico Vale (ITV) um robô com o intuito de realizar o mapeamento de cavidades. Os operadores podem utilizar os dados coletados para analisar antecipadamente os riscos do ambiente.

Conhecido como EspeleoRobô, este dispositivo é inspirado no robô hexápode RHex (Boston Dynamics [16]). Devido à heterogeneidade dos terrenos que podem ser encontrados em cavidades naturais é usada locomoção mista entre rodas e pernas dependendo da situação (Figura 3). Os modos de locomoção podem ser alterados mediante um sistema de troca rápida desenvolvida especialmente para o robô.

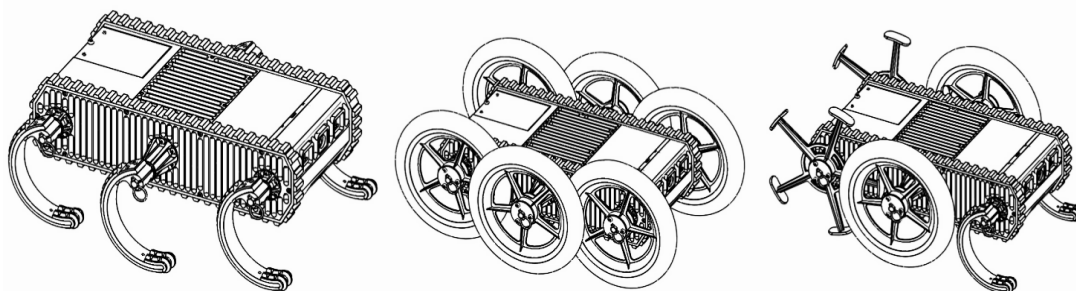


Figura 3 - Configurações de locomoção do EspeleoRobô hexápode original, apenas com rodas e híbrida, respectivamente.

Mecanicamente, o protótipo do robô desenvolvido é constituído de peças em poliacetal e alumínio; materiais de baixa densidade. A comunicação com a base de operações é realizada através do rádio *wireless* digital Ubiquiti Rocket M900. Há seis motores CC para acionamento de cada eixo do robô, separadamente. A comunicação com estes é realizada através de barramento CAN. O computador central de controle do robô é um Intel® NUC de alto desempenho. Toda a programação do dispositivo foi feita utilizando ROS.

O robô já foi a campo em diferentes tipos de terreno. Na mina da Passagem (Mariana-MG) foram testadas a locomoção e, principalmente, a comunicação em ambientes subterrâneos; foi atingida a marca de 175m de comunicação sem fio em ambiente confinado. Em parceria com a prefeitura de Ouro Preto, o robô foi levado a uma mina abandonada em área de risco (Figura 4(a)). Mesmo com solo lamacento e com filetes d'água, o dispositivo demonstrou boa mobilidade e funcionamento. Mais recentemente o EspeleoRobô foi levado para inspecionar a galeria da barragem do

Rio do Peixe, Itabira-MG (Figura 4(b)). Foram obtidas inclusive imagens com luzes infravermelhas do interior da galeria.



(a) Mina abandonada localizada em área de risco, Ouro Preto-MG



(b) Barragem de Rio Peixe, Itabira-MG

Figura 4 - Testes de campo

Apesar de ter sua concepção focada na exploração de cavidades, o robô já se mostrou polivalente para investigar outros tipos de ambientes. Sua flexibilidade no modo de locomoção utilizado permite que este seja usado nos mais variados tipos de terreno, sejam eles confinados ou não. O EspeleoRobô se mostra então uma ferramenta já concebida muito relevante quando há a necessidade de explorar um ambiente onde o ser humano não possa, ou não deva, ir.

4.3 Teleoperação de equipamentos de mineração

Dentre os diversos equipamentos de mineração aos quais as técnicas de teleoperação são aplicadas, as escavadeiras são uma aplicação potencial. No processo de transporte, estes equipamentos são os mais utilizados para movimentação do material até caminhões ou outros mecanismos de transporte. Devido às dificuldades técnicas em se obter uma escavadeira verdadeiramente autônoma, as técnicas de teleoperação tem sido extensivamente aplicadas com o objetivo de se otimizar tal operação (Moon et al. [17]; Yusof et al. [18]).

No ITV, a aplicação da teleoperação à escavadeira está sendo investigada por meio da realização de testes de conceito em laboratório utilizando uma plataforma robótica móvel equipada com um braço robótico e diversos equipamentos sensores. O objetivo é analisar que tipo de informação efetivamente contribui para que a teleoperação mais eficiente, eficaz e segura. Para tal, um sistema de teleimersão está sendo desenvolvido. Este sistema permitirá a interação entre o operador (sistema local) e a plataforma robótica (sistema remoto). O sistema local utilizará um óculos de realidade virtual e uma plataforma robótica móvel Seekur Jr. equipada com um braço manipulador Schunk Powerball de seis graus de liberdade contendo um sensor de força e torque no efetuador, sendo capaz de representar e operar de maneira similar a equipamentos da mineração.

O Seekur Jr. integra uma série de dispositivos: Câmera PTZ RVision SEE, Câmera estéreo MobileRanger C3D, Laser range finder SICK LMS-111 e IMU. Os sensores visuais fornecerão as imagens até o operador usando óculos de realidade virtual com a finalidade de aumentar a imersão. Os dispositivos hápticos serão utilizados para prover ao operador uma sensação mais realista de todas as

interações mecânicas entre o equipamento teleoperado e o meio.

Dois dispositivos hápticos são utilizados: um Novint Falcon e um Phantom Omni. O Falcon será utilizado para comandar a locomoção do robô. Com isso, será possível realimentar para o operador a informação caso o robô esteja, por exemplo, prestes a atingir um obstáculo, de tal forma que, caso o operador insista em direcionar o robô no sentido do obstáculo, ele literalmente sinta resistência no dispositivo háptico. Enquanto que o Phantom será utilizado para comandar o manipulador robótico e a possibilidade de realimentação de informações de colisão também se aplicará a este caso, considerando-se que o manipulador robótico integra em seu efetuator um sensor de força e torque através do qual as informações sobre as forças externas atuando sobre o mesmo serão obtidas. Os dados coletados pelo laser presente na plataforma robótica serão utilizados para o mapeamento do ambiente onde o equipamento teleoperado se encontrará. Esta informação, ao ser transmitida para o operador, irá aprimorar sua capacidade de visualização do ambiente remoto e poderá ser utilizada na definição do caminho a ser percorrido pelo equipamento e na detecção de possíveis obstáculos a serem transpostos.

Na Figura 5 é mostrado o ambiente no qual testes preliminares de locomoção foram realizados, destacando a separação física entre o operador e a plataforma robótica teleoperada.



(a) Ambiente local (operador)

(b) Ambiente remoto (robô)

Figura 5: Ambiente de realização de testes

Assim, é esperado que os resultados experimentais apontem para uma forma eficaz de se construir um ambiente de teleoperação que permita ao operador uma sensação o mais realista possível ao interagir com o ambiente remoto e o equipamento teleoperado.

4.4 Carregamento de explosivos

Uma das atividades que envolvem alto risco na mineração é o carregamento e detonação de explosivos. Nós propomos uma possível solução aos riscos da atividade, através do carregamento autônomo de explosivos na região de desmonte de minério usando robôs móveis.

Tradicionalmente, o carregamento de explosivos requer uma equipe especialista que, na região de desmonte, insere uma mangueira no furo de detonação para carregar os explosivos através de uma bomba. Essas atividades, que normalmente seriam executadas pela equipe treinada, seriam futuramente realizadas por uma plataforma móvel equipada com um braço manipulador.

A plataforma móvel utilizada é também o Seekur Jr. A emulação do

carregamento de explosivos executada pela plataforma proposta é dividida em 3 etapas: (i) Navegação até a região do furo, localização e inserção da mangueira no furo. A navegação autônoma até a região do furo é realizada através de técnicas de mapeamento e localização simultâneas (SLAM) e algoritmos de planejamento de trajetória (Dijkstra e Trajectory Rollout); (ii) A localização do furo é feita através de processamento de imagens (detecção de círculos e elipses) adquiridas por uma câmera estéreo; (iii) E, por último, com a posição do furo calculada, o braço manipulador utiliza algoritmos de busca em árvores (RRT) para planejar uma trajetória e projetar o braço sobre o furo (Figura 6).

O sistema foi avaliado em ambientes controlados de laboratório mostrando a factibilidade da aplicação deste tipo de tecnologia em ambientes de mina. Futuros experimentos serão realizados em ambientes reais, com o uso de sensores mais robustos para a adequação ao ambiente.

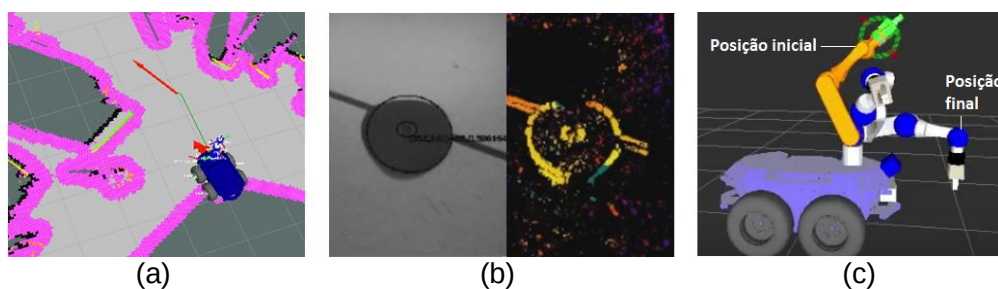


Figura 6: Emulação do carregamento de explosivos: (a) mapeamento e navegação autônoma, (b) detecção do furo, (c) posicionamento do manipulador sobre o furo

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma visão geral sobre o estado da arte da robótica na mineração no mundo, e especificamente um conjunto de alguns dos trabalhos mais relevantes sendo desenvolvidos na mineração no Brasil. Muitos dos problemas abordados pela robótica na mineração tratam sobre segurança e aumento da eficiência. Existe o uso de robôs teleoperados, semi-autônomos e autônomos, diminuindo o risco de operadores. Ao redor do mundo temos uso de veículos de transporte totalmente autônomos funcionando praticamente 24h/dia e sistemas de controle robustos que gerenciam e controlam todo o movimento do minério, desde a sua extração na mina até o envio final no porto. O uso de robótica de manipuladores é muito estendido para tarefas altamente repetitivas ou perigosas como troca de pneus de caminhão ou posicionamento de barras de metal, o que traz uma grande vantagem em segurança para os operadores.

Também foram mostradas as dificuldades de implantação das novas tecnologias em ambientes difíceis como a minas a céu aberto ou portos, onde: poeira, alta temperatura, excesso de umidade e dificuldade de acesso, tornam a tarefa de automatização um grande desafio tecnológico.

Embora a robótica esteja avançada o suficiente para resolver alguns dos problemas clássicos da mineração como transporte, monitoramento, inspeção e segurança, o Brasil ainda é uma região onde existem muitos desafios a serem resolvidos devido à grande oportunidade de inserção de tecnologias novas. Com a

abertura das empresas ao uso de novas tecnologias e aumento dos investimentos em pesquisa dentro da mina, o uso da robótica para suporte das operações será comum nos próximos anos, sendo ele um dos pilares da Mineração 4.0.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à equipe do Laboratório de Robótica do Instituto Tecnológico Vale. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, Vale S.A e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- 1 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. Springer, 2008.
- 2 SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer handbook of robotics**. 2ª. Springer, 2016.
- 3 SINGH, Sanjiv. State of the art in automation of earthmoving. **Journal of Aerospace Engineering**. 1997; v. 10, n. 4, p. 179-188.
- 4 United States Department of Labor: Mine Safety and Health Administration. ALL MINING FATALITIES BY STATE by CALENDAR YEAR 2017. 2017 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: <https://arlweb.msha.gov/stats/charts/allstates.pdf>.
- 5 DUFF, Elliot et al. The development of a telerobotic rock breaker. In: **Field and Service Robotics**. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 411-420.
- 6 BONCHIS, Adrian et al. Robotic explosive charging in mining and construction applications. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**. 2014; v. 11, n. 1, p. 245-250.
- 7 HAYASHI, Kouki; TAMURA, Takayuki. Teleoperation performance using excavator with tactile feedback. In: **Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on**. IEEE, 2009. p. 2759-2764.
- 8 LARSSON, Johan; BROXVALL, Mathias; SAFFIOTTI, Alessandro. An evaluation of local autonomy applied to teleoperated vehicles in underground mines. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on**. IEEE, 2010. p. 1745-1752.
- 9 JORDAN, Pav Jordan: Chile's new Gaby copper mine steps into the future. Reuters. 2008. [acesso em 10 jun. 2017]; Disponível em: <http://uk.reuters.com/article/chile-codelco-gaby-idUKN2133325020080521>.
- 10 BELLAMY, Drew; PRAVICA, Luka. Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. **Resources Policy**. 2011. v. 36, n. 2, p. 149-158.
- 11 HENDERSON, Jason; SPENCER, Jason. Autonomous Vehicles and Commercial Real Estate. **Cornell Real Estate Review**. 2016 v. 14, n. 1, p. 14.
- 12 Rio Tinto Media. Rio Tinto improves productivity through the world's largest fleet of owned and operated autonomous trucks. 2014 [acesso em 12 jun. 2017]. Disponível em: http://www.riotinto.com/media/media-releases-237_10603.aspx.
- 13 MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. de; OGANDO, Laura Duarte. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. 2016. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 43.
- 14 BARTOLOMEU, Paulo et al. Integração de Informação na equipa de Futebol Robótico CAMBADA. **Electrónica e Telecomunicações**. 2005. v. 4, n. 4, p. 467-477.
- 15 ROS. 2013 [acesso em 22 jan. 2017]; Disponível em: <http://www.ros.org/about-ros/>
- 16 RHEX, Boston Dynamics. 2017. [acesso em 30 jan. 2017]. Disponível em: http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html.
- 17 MOON, S. M. et al. Development of tele-operation control station for intelligent excavator. **IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications**, 2009. p.123-128.
- 18 YUSOF, Ahmad Anas et al. Modern practical application and research on teleoperated excavators control, feedback and perception issues in post disaster recovery operation. In: **Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), 2015 IEEE International Symposium on**. IEEE, 2015. p. 179-185.