

Improving the robustness of motion modelling and control for mobile robots in harsh conditions

Dominic Baril (111 103 819)

December 2023

Supervised by Prof. F. Pomerleau
and co-supervised by Prof. P. Giguère

1 Introduction

The field of mobile robotics has known significant advances in the last decade, leading to potentially disruptive innovations in automation for various industries. Autonomous systems are currently mature enough to be functional in controlled and structured operational environments, such as warehouses and urban areas under ideal weather. uncrewed ground vehicles (UGVs) are proving to be effective solutions to current society issues related to labor shortage, workplace security and operational efficiency. However, such issues are greater for industries industries such as agriculture, forestry, defense, mining and search and rescue, which require operation in outdoors, uncontrolled environments. In these cases, systems are subject to a higher spectrum of environmental hazards, such as harsh weather, traction variability and deployment in remote environments. However, as stated by Van Brummelen *et al.* [1], challenges inherent to these conditions remain an open question.

This work aims to extend proficiency and robustness of autonomous navigation systems to off-road environments and harsh weather. Autonomous navigation can be split into three key components: path planning, path following and localization. This work mainly focuses on path following, with some contributions to localization. For path following, the key problems related to navigating in such environments are the high variability of wheel-to-ground traction and complex vehicle dynamics. For localization, the key problems are related to navigating in Global Navigation Satellite System (GNSS)-denied conditions, low geometrical constraints and dynamic environments. In all, the research question for this work can be stated as follows:

How to increase robustness of UGV path following and localization for off-road and winter conditions?

A UGV motion model is a key component to compute optimal commands with respect to motion predictions and provide localization prior for localization systems. Thus, this research project is focused at minimizing motion prediction error for models, which is directly correlated with path following and localization errors. Current approaches for UGV modeling belong to two families: Model-based, divided between kinematic and dynamic models,

and Learning-based, leveraging machine learning and driving data to predict motion. Both kinematic models and learning-based approaches share the advantage that they have a low expertise requirement for deployment and require a training dataset to reduce prediction error, leading them being the most popular choice. To answer the aforementioned research question, three key issues were identified:

1. **How does UGV behavior differ between concrete and snow-covered terrain navigating. What kinematic model behaves best for both?**
2. **How can we standardize training dataset gathering and improve vehicle slip learning?**
3. **What are the impacts of the boreal forest environment and winter weather on lidar-based localization?**

These key issues guide the scientific contributions that were made through this work. The reminder of this document describes the current scientific production done through this project and upcoming plan up to thesis submission. More specifically, [section 2](#) describes the currently submitted and published research work, summarizing contributions and lessons learned for each paper. Afterwards, [section 3](#) details the remaining research work [section 4](#) and provides a schedule leading to thesis submission. Lastly, [section 5](#) provides a brief conclusion.

2 Current scientific production

This section describes the current scientific done through this Ph.D. thesis work and collaborations done with other researchers. First, the three articles conducted directly for which I acted as first author. All of these scientific contributions are related to the subproblems states in [section 1](#). Then all of the worth in which I have participated as co-author is described briefly. Since mobile robotics is a field requiring various expertise and human resources to conduct field deployments, all scientific production presented includes multiple co-authors.

2.1 Articles published and submitted as first author

D. Baril, V. Grondin, S.-P. Deschenes, J. Laconte, M. Vaidis, V. Kubelka, A. Gallant, P. Giguere, and F. Pomerleau, “Evaluation of Skid-Steering Kinematic Models for Subarctic Environments”, in *2020 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2020, pp. 198–205

The first article that I have published was submitted to the *Conference on Robot and Vision (CRV)*, in May 2020. This article aims to evaluate the performance of skid-steering mobile

robots (SSMRs) kinematic motion models on dry concrete and snow-covered terrain. For this article In this article, we collected a total of 2 km of human driving data to evaluate four kinematic models from the literature. We leverage lidar point cloud registration based on the iterative closest point (ICP) algorithm to generate ground truth localization. This work received the **Best Robot Paper Award** for the CRV conference this year. The resulting contributions are as follows:

1. Validate SSMR kinematic motion models fitness for a heavier platform on a relatively uniform concrete terrain;
2. Evaluate SSMR kinematic motion models their performance for snow-covered terrain using more than 2 km of trajectories traveled; and
3. Highlight the impact of angular motion on the accuracy of SSMRs kinematic modeling.

The four kinematic models evaluated are the extended differential-drive asymmetrical, the extended differential-drive symmetrical [3], the full linear [4] and radius of curvature (ROC)-based [5]. We also show that models with less parameters tend to perform better for angular prediction and models with more parameters perform better for translation prediction, due to their ability to predict non-zero lateral motion. However, once trained, the performance of all models is similar for both terrain types, suggesting that all kinematic models evaluated behave similarly. The largest prediction error occurs when the vehicle’s angular velocity is at its maximum, which leads to the highest amount of vehicle slip.

Additionally, training kinematic models with empirical driving data leads to significant prediction error reduction, for both concrete and snow-covered terrain. The relation between training window and prediction error is also studied in this work, clearly showing that models perform best when predicting for the same horizon for which they were trained. We show that for the same commanded angular velocity, angular velocity is higher on snow-covered terrain than concrete. This phenomenon is due to the high friction caused by the tire deformation occurring during skidding on concrete, compared to soft terrain deformation on snow-covered terrain.

The take home message for this published paper was that kinematic motion models are adequate for predicting SSMR motion, both on dry concrete and snow-covered terrain, however they require a training dataset dependent to vehicle and terrain properties. During the experimental work conducted for this paper, we imitated similar work by having a human operator to stimulate as many commands as possible, however this process lead to biased command stimulation and forward-only driving and proved to be time-consuming. Since deploying UGVs in off-road environments is a complex endeavor, reducing the time requiring to generate a motion model that is accurate enough for stable autonomous navigation is key.

D. Baril, S.-P. Deschênes, L. Coupal, C. Goffin, J. Lépine, P. Giguère, and F. Pomerleau, “Drive: Data-driven robot input vector exploration”, *ArXiv preprint, submitted to ICRA 2024*,

My second article as first author was submitted to the *International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2024*. It is currently under review, with a result expected in January 2024. This article aims to solve the issue discovered in our previous work by standardizing and automating the UGV training dataset gathering task. Thus, we propose Data-driven Robot Input Vector Exploration (DRIVE), a protocol allowing to automatically generate a training dataset for commercial UGVs. We also propose a novel SSMR dynamics-based slip learning model, outperforming similar models. The experimental evaluation for this work totals over 7 km of driving data, conducted through three SSMRs with weights ranging from 75 kg to 470 kg. The deployment environments include indoor tile, snow-covered terrain, dry gravel and an indoor, leveled ice rink. Again, localization is provided by our local mapping framework, based on the ICP algorithm. The code and datasets are all available online and open-source.¹ For this work, the contributions are as follows:

1. DRIVE, a standardized UGV characterization and motion data generation protocol allowing to train motion models on the entire vehicle input space;
2. A novel slip-based UGV motion prediction model, leveraging the accuracy of model-based approaches and the minimal system characterization requirement of learning-based approaches.

As shown in our previously published work [2], a training dataset specific to vehicle and terrain properties is key to reduce motion prediction error. Most work on UGV motion modeling includes training dataset gathering, however, there exists little-to-no guidelines available to reproduce their work. DRIVE enables automatic UGV input-space characterization and training dataset gathering by sampling uniformly through the input-space. We show that this protocol leads to significantly increased prediction performance when compared to manual driving and radius of curvature (ROC) stimulation approaches. Another key finding is that for all experiments conducted, models reach convergence with a maximum of 46 sec of driving data. This result is of high importance for field robotics operations, which are costly to deploy and for which UGV battery conservation is critical [7]. It also enables model re-training when driving conditions change drastically.

Furthermore, we propose a novel slip learning model outperforming similar learning models for SSMRs navigation in off-road terrain. Contrarily to our previous work [2], we rely on additive slip, which facilitates slip learning since slip is computed by subtracting the commanded body velocity to the observed body velocity, similarly as proposed by Seegmiller *et al.* [8]. For slip learning, we rely on Bayesian linear regression (BLR), which enable fast prediction and training, which is ideal for realtime UGV deployment [9]. We show that by leveraging dynamics-aware basis functions for BLR, we have significant slip prediction performance improvement over the baseline BLR learning approach, which learns vehicle

¹<https://github.com/norlab-ulaval/DRIVE>

acceleration. The operational limit for our model is reached on the ice rink experiments, where extreme UGV severely impacts UGV motion.

The biggest lesson learned is that DRIVE enables training dataset gathering for model convergence in 46 sec, for our slip-BLR model, which outperforms similar learning approaches. This protocol is interesting for field operations as it enables users to generate an accurate motion prediction model for any new UGV or environment configuration, effectively saving a lot of deployment resources and battery usage. As future work, we want to investigate dynamic modeling on the ice rink experiment to see if richer modeling approaches can improve prediction accuracy under dynamically complex driving conditions. This experimental dataset is also ideal to investigate the limit of adaptive modeling approaches by simulating a robot instantly changing terrain type.

D. Baril, S.-P. Deschênes, O. Gamache, M. Vaidis, D. LaRocque, J. Laconte, V. Kubelka, P. Giguère, and F. Pomerleau, “Kilometer-scale autonomous navigation in subarctic forests: challenges and lessons learned”, *Field Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 1628–1660, 2022

The third article that concludes the list of articles submitted as first author was submitted and published in the *Field Robotics* journal. In this paper, we leverage the models evaluated in our previous work with our lidar-based localization and mapping system to create the Weather-Invariant Lidar-based Navigation (WILN) autonomous navigation system and conduct 18.8km of autonomous driving. For this work, we were awarded the **Relève Etoile Louis-Berlinguet Award** from FRQNT. We leverage the data acquired to produce a field report documenting the impact of the boreal forest biome and winter weather on lidar-based autonomous navigation. The dataset gathered in the field is available online and open-source.² The specific contributions for this article are as follows:

1. A comprehensive study of the impact of the boreal forest biome on lidar- and GNSS-based localization and autonomous navigation;
2. An overview of the impact of snow accumulation on the reliability of lidar-based localization over multiple days; and
3. A description of the WILN system, designed to enable wintertime autonomous navigation in a boreal forest.

While we have validated lidar-based localization and mapping is suitable for autonomous navigation the test environment, we observed particular phenomenons that can lead to navigation failure, most of which are related to lidar localization. First, when navigating in a

²https://github.com/norlab-ulaval/Norlab_wiki/wiki/Kilometer-scale-autonomous-navigation-in-subarctic-forests:-challenges-and-lessons-learned

corridor-like forest trail, under dense vegetation, the low longitudinal geometric constraints lead to localization instability, which caused the UGV to crash with vegetation in some occasions. Secondly, the snow accumulation causes the environment to change significantly, which was critical in areas where man-made structures are present to support lidar-based localization. For those issues, we have documented the impact on our localization system and highlighted the challenges to be solved to enable true year-long autonomy in boreal forests. An analysis of the quality of GNSS signal under the dense vegetation of boreal forests was also conducted, showing that it is unsuitable for navigation in tight forest trails, but functional on larger forest paths.

Since it was not the main focus for this work, an operator drove periodically with a snowmobile over the paths navigated by the UGV to tap the snow and enable large-scale navigation. We still investigated the impact of the environment on our selected kinematic path following controller [10]. Under these conditions, we show that the path following error is strongly correlated with reference path curvature, meaning that the most likely cause for path following failure is tight turning in forest trails. Qualitatively, we also show that deep snow navigation is complex for SSMRs since it significantly reduces the vehicle’s ability to turn.

For this work, the main take home message is that kinematic motion modeling and lidar-based localization are suitable for wintertime navigation in boreal forests, but that challenges remain to be solved for true year-long autonomy. First, localization robustness to areas with corridor-like environments and dynamic environments should be addressed, by adapting the reference map and adding localization constraints. Secondly, kinematic path following controllers are suitable for condensed or shallow snow, but fail in deep snow. Thirdly, energy consumption estimation and prediction is complex in cold weather, however it is key to maximize UGV usage and prevent breakdown in remote areas. While those are the main challenges observed, multiple more lessons learned are highlighted in this work.

2.2 Articles published and submitted as co-author

S.-P. Deschenes, D. Baril, V. Kubelka, P. Giguere, and F. Pomerleau, “Lidar Scan Registration Robust to Extreme Motions”, in *2021 18th Conference on Robots and Vision (CRV)*, IEEE, 2021, pp. 17–24: Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus.

Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

**T. Rouček, M. Pecka, P. Čížek, T. Petříček, J. Bayer, V. Šalanský, T. Aza-
yev, D. Heřt, M. Petrлік, T. Báča, V. Spurný, V. Krátký, P. Petráček, D. Baril,
M. Vaidis, V. Kubelka, F. Pomerleau, J. Faigl, K. Zimmermann, M. Saska, T.
Svoboda, and T. Krajník, “System for multi-robotic exploration of underground
environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge”,
Field Robotics, vol. 2, no. 1, pp. 1779–1818, Mar. 2022:** Lorem ipsum dolor sit amet,
consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, fe-
lis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id,
vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique
senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus
rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet
tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Prae-
sent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu,
pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus.
Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci
dignissim rutrum.

**C. Courcelle, D. Baril, F. Pomerleau, and J. Laconte, “On the Importance of
Quantifying Visibility for Autonomous Vehicles Under Extreme Precipitation”,
in *Towards Human-Vehicle Harmonization*, De Gruyter, 2023, pp. 239–250:** Lo-
rem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat
ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy
eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque ha-
bitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo.
Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus
eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra
ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla,
malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius
orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget
orci sit amet orci dignissim rutrum.

Deschenes2023: Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus
elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris.
Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula au-
gue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac
turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum
urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien

est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

3 Recherches futures

Dans les ?? ont été présentés le travail réalisé pour mettre au point le système de stations totales robotiques, ainsi que la collecte de données dans différents types d’environnement avec une précision sub-centimétrique. Les deux premières problématiques de mon doctorat concernant la mise au point de ce système de collecte de données ainsi que l’obtention d’une calibration extrinsèque de précision ont été détaillées et résolues. La présente section détaille les travaux de recherches que je planifie afin de répondre à ma dernière problématique de recherche, à savoir comment utiliser les données récoltées pour générer des vérités terrains précises dans l’ordre du millimètre, et effectuer des comparaisons de trajectoires avec ces vérités terrains. Le calendrier détaillé de mes recherches restantes est présenté dans la [section 4](#).

3.1 Génération de vérités terrains

La dernière partie de mon doctorat se concentrera donc sur la génération des vérités terrains, ce qui est la suite logique de mes travaux de recherches, ainsi que le but ultime de mon système de stations totales robotiques. Cette dernière problématique se décompose en trois sous-parties:

1. La génération des vérités terrains,
2. La gestion de l’incertitude,
3. L’évaluation de trajectoires avec ces vérités terrains.

La génération de vérités terrains, à savoir la pose de la plateforme robotique en six degrés de liberté, a déjà été succinctement évoquée dans le papier CRV 2021: sa faisabilité a été démontrée. Celle-ci a été effectuée après l’interpolation des trajectoires de prismes par une minimisation point-à-point entre les positions théoriques des prismes les uns par rapport aux autres, et leurs positions mesurées sur le terrain. Dans le papier d’ICRA 2023, nous avons relaté que l’utilisation de modules de filtrage permettait d’augmenter la précision de 18 % des résultats finaux. Nous souhaitons appliquer le même principe à la génération des vérités terrains pour en augmenter la précision, et utiliser d’autres méthodes d’interpolation

ou d’optimisation de trajectoires pour générer ces vérités terrains et évaluer quelles en sont les meilleures, notamment pour quantifier l’incertitude.

L’incertitude est rarement quantifiée lors de la génération de vérités terrains. Elle l’est encore moins pour l’évaluation de trajectoires par rapport à celles-ci. Avec notre système de trois stations totales et des trois prismes, nous avons la possibilité de pouvoir estimer l’incertitude grâce à la métrique de la distance inter-prisme. C’est pourquoi l’objectif de mes prochaines recherches portera sur la manière de quantifier cette incertitude à l’aide des expériences effectuées. Mon souhait est également d’exploiter cette incertitude pour ce qui concerne la comparaison de trajectoires.

L’évaluation de trajectoires avec des vérités terrains se fait depuis de nombreuses années. La très grande majorité des évaluations utilise la norme euclidienne pour établir les comparaisons. Cette norme est facile à mettre en application, mais elle ne prend pas en compte l’incertitude, ce qui peut fausser le résultat et donc rendre inutilisable la vérité terrain. Ces situations peuvent se produire lorsqu’un GNSS est utilisé pour générer une vérité terrain, alors que son signal n’est pas bon. Une incertitude de plusieurs mètres peut alors apparaître comme ce fut le cas pour le jeu de données du Kitty Dataset ³, lequel compare des trajectoires données par des algorithmes de cartographie à sa vérité terrain issue d’un GNSS. En dessous de 100 m d’évaluation par une métrique d’erreur de pose relative, les résultats peuvent être biaisés. Les auteurs du jeu de données ont donc mis la distance d’évaluation pour une métrique d’erreur de pose relative à 100 m au minimum pour éviter ces cas. Dans mes recherches, je souhaite améliorer la prise en compte de l’incertitude concernant l’évaluation de trajectoires. Cela permettra un résultat plus représentatif pour effectuer des comparaisons d’algorithmes entre eux.

Ces trois sous-parties de ma problématique finale seront développées dans un article de journal que je soumettrai fin mars 2023. Le journal visé sera celui de “Field Robotics” ⁴. Cet article de journal se concentrera sur la manière dont on générera les vérités terrains avec notre système de stations totales robotiques. Il sera une suite logique des deux premiers articles, et présentera des jeux de données provenant de déploiements effectués durant une année entière (février 2022 à décembre 2022) afin de pouvoir montrer la plus-value de notre système dans différents types d’environnements et dans différentes conditions météorologiques. Le détail des expériences à faire est présenté dans la prochaine sous-section.

3.2 Expériences prévues

Afin de préparer mes recherches futures, plus d’une dizaine de déploiements sont prévus en ces mois de novembre et décembre 2022. Je collecterai les données manquantes à la présentation de mon travail dans l’article de journal. Ces déploiements sont répartis en plusieurs étapes correspondant à différentes parties de ma recherche, à savoir l’évaluation de la précision du

³https://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_odometry.php

⁴<https://www.journalfieldrobotics.org/Field-Robotics/Home.html>

système de stations totales robotiques dans différentes conditions, la comparaison de celle-ci avec les GNSS sur un plus grand nombre de données, et la récolte de plus de données en forêt de Montmorency.

Quelques évaluations ont déjà été réalisées et répertoriées dans l'article de CRV 2021 sur notre système afin de caractériser la précision de ce dernier. Cependant, le jeu de données alors utilisé comprenait moins de 500 m de trajectoires de la plateforme robotique et la méthode de calibration extrinsèque utilisée n'était pas aussi précise que celle développée dans l'article d'ICRA 2023. Quelques expériences pour mieux comprendre notre système font défaut au jeu de données utilisé dans l'article d'ICRA 2023: à savoir la distance limite de la prise de données due à la distance maximale permise par les stations totales ainsi que la distance maximale des modules LoRa de communication. Des expériences seront donc menées afin de quantifier ces limites, mais également afin de quantifier la précision en fonction de la distance de la prise de mesure. De plus, dans les articles de CRV 2021 et d'ICRA 2023 a été soulevée la question de l'influence de la position des prismes sur la plateforme robotique. Des simulations et des expériences seront menées afin de pouvoir répondre à cette question.

Dans l'article de CRV 2021, a été effectuée une comparaison avec des données GNSS en milieux ouverts ainsi qu'en forêt. Pour faire suite aux récentes améliorations apportées à notre système, une collecte de données plus conséquente sera réalisée dans le but d'augmenter le nombre de données exploitables en plus de celles utilisées pour le papier d'ICRA 2023. Les données GNSS ont pour le moment uniquement servi à comparer la précision du système par rapport à la métrique de la distance inter-prisme ou inter-GNSS. Les données que nous récolterons prochainement serviront cette fois à faire des comparaisons de trajectoires avec les vérités terrains. De plus, les trajets effectués prendront en compte différents types de scénarios, tels que l'alternance de milieux ouverts ou couverts, afin de mettre en évidence les problèmes des GNSS comparés à notre système de stations totales.

Enfin, il est prévu de faire des déploiements en forêt de Montmorency dans le but de recueillir des données avec météo variable: par temps de brouillard et de chutes de neige afin de quantifier la précision de notre système pendant ces épisodes climatiques. De ce fait, au moins deux déploiements sont prévus à un mois d'écart: le premier au début du mois de novembre 2022 (sans neige), puis le second au début du mois de décembre (avec neige). Les deux plateformes robotiques seront utilisées afin de maximiser la prise de données durant ces déploiements. Ces expériences visant à comparer les jeux de données seront cependant toujours réalisées au même endroit, quelle que soit la météo.

Il est à noter que pour chacun des déploiements effectués, les données provenant de capteurs lidars seront également récoltées afin de pouvoir comparer la trajectoire donnée par notre algorithme de cartographie 3D à celle issue de notre système de stations totales robotiques ou de GNSS. Ainsi, grâce à chaque expérience menée, nous pourrions étudier un résultat spécifique et le présenter dans l'article de journal. Le jeu de données de l'article d'ICRA 2023 sera également exploité pour certains résultats et certaines comparaisons, comme cela

avait été prévu initialement. Au total, nous souhaitons avoir plus de 50 km de trajectoires de plateforme robotiques afin d'éliminer certaines valeurs aberrantes lors de la génération des résultats, et pouvoir ainsi accéder à un jeu de données complet prenant en compte différents types d'événements. Cela nous est nécessaire si nous souhaitons trouver les limites de notre système, comme ce fut le cas par exemple dans l'article d'ICRA 2023.

4 Calendrier des recherches futures

Le calendrier détaillé de la planification des objectifs pour la rédaction du prochain article de journal est située dans la ?? en annexe. Ce calendrier s'étend de novembre 2022 à mars 2023. Les différentes étapes de mes recherches y sont présentées: expériences à faire sur le terrain, génération des vérités terrains, prise en compte de l'incertitude pour ces générations, évaluation de trajectoires, et enfin rédaction de l'article de journal.

Mon article de journal rédigé, je me concentrerai sur la rédaction de ma thèse. La [figure 1](#) montre le calendrier de la planification des objectifs pour le dépôt final de la thèse. Je souhaite réaliser une thèse par articles. Elle en comportera trois que j'ai publiés ou soumis: CRV 2021, ICRA 2023 et Field Robotics 2023. S'il est accepté, l'article d'ICRA 2023 sera présenté à la conférence à la fin du mois de mai 2023. Pour ce qui est de l'article du journal Field Robotics, il sera probablement publié d'ici un an ou deux, soit en 2024 ou 2025, après les différentes rondes de révisions.

Je prévois deux mois de rédaction de thèse juste après la soumission de mon article de journal, soit en avril et mai 2023. Je ferai mon dépôt initial au mois de mai 2023. Après une période de 6 à 8 semaines, je pourrai effectuer ma défense durant le mois de juillet 2023. Si ma thèse est acceptée, il m'appartiendra de faire les corrections données par mon comité pour un dépôt final escompté au mois d'août 2023.

5 Conclusion

À travers cette proposition de thèse, un récapitulatif de mes contributions vis-à-vis de ma problématique de recherche a été présenté, et la planification de la fin de mon doctorat a été détaillée. J'ai démontré que j'avais suffisamment avancé dans mes recherches et que je serai sur le point d'effectuer mon dépôt initial d'ici à quelques mois. La problématique de ma recherche porte sur la génération précise de trajectoires de références pour les véhicules en mouvement ainsi que de leur évaluation. Deux sous-parties de ma problématique de recherche ont déjà été abordés et résolus à travers la publication de deux articles de conférence, dont un soumis en septembre dernier. Dans un premier temps, un système basé sur trois stations totales robotiques a été créé et testé sur le terrain dans le but de pouvoir générer des vérités terrains ayant une précision sub-centimétrique. Par la suite, une amélioration de la calibration extrinsèque entre les différents référentiels de ces stations totales robotiques a

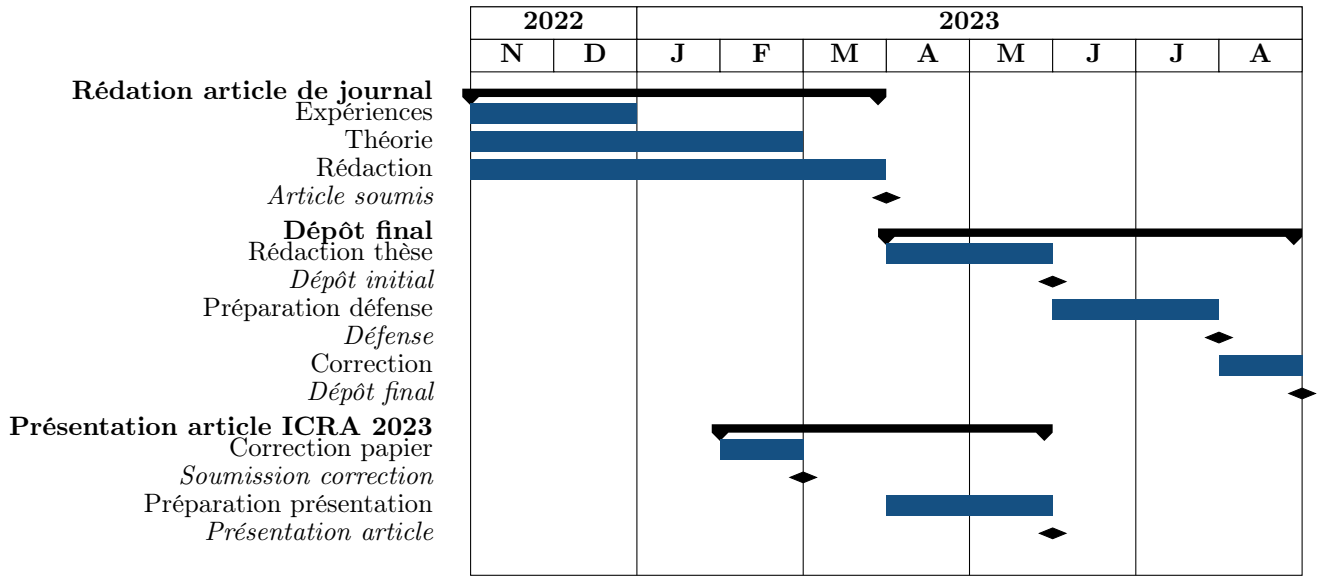


Figure 1: Diagramme de Gantt contenant les objectifs devant être accompli d’ici au dépôt final de la thèse.

été proposée et validée sur un jeu de données de plus de 30 km de trajectoires de plateformes robotiques. Mes travaux actuels portent sur la publication d’un dernier article de journal qui finalisera mes recherches. Cet article abordera la problématique de l’évaluation des trajectoires de références accompagnée de celles générées par des algorithmes de cartographie 3D. Il abordera également la gestion de l’incertitude dans ces évaluations et mentionnera l’impact de cette incertitude sur les résultats.

Le calendrier des étapes restantes a été détaillé dans la [section 4](#). La rédaction de mon article de journal aura lieu du mois de novembre 2022 au mois de mars 2023. Ensuite sera effectuée la rédaction de ma thèse. Je prévois une rédaction de thèse par articles comme cités dans ce document, à savoir l’article de CRV 2021, l’article de ICRA 2023 et l’article de journal Field Robotics 2023 que je rédigerai. Le dépôt initial de ma thèse aura lieu au mois de mai 2023 et ma défense devrait se tenir durant le mois de juillet 2023. Je prévois ainsi de terminer mon dépôt final durant le mois d’août 2023 après avoir effectué les corrections demandées suite à ma défense.

References

- [1] J. Van Brummelen, M. O'Brien, D. Gruyer, and H. Najjaran, "Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 89, no. July 2017, pp. 384–406, 2018.
- [2] D. Baril, V. Grondin, S.-P. Deschenes, *et al.*, "Evaluation of Skid-Steering Kinematic Models for Subarctic Environments", in *2020 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, IEEE, 2020, pp. 198–205.
- [3] A. Mandow, J. L. Martinez, J. Morales, J. L. Blanco, A. Garcia-Cerezo, and J. Gonzalez, "Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile robots", in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2007, pp. 1222–1227.
- [4] G. Anousaki and K. Kyriakopoulos, "A dead-reckoning scheme for skid-steered vehicles in outdoor environments", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, IEEE, 2004, 580–585 Vol.1.
- [5] T. Wang, Y. Wu, J. Liang, C. Han, J. Chen, and Q. Zhao, "Analysis and Experimental Kinematics of a Skid-Steering Wheeled Robot Based on a Laser Scanner Sensor", *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 9681–9702, 2015.
- [6] D. Baril, S.-P. Deschênes, L. Coupal, *et al.*, "Drive: Data-driven robot input vector exploration", *ArXiv preprint, submitted to ICRA 2024*,
- [7] D. Baril, S.-P. Deschênes, O. Gamache, *et al.*, "Kilometer-scale autonomous navigation in subarctic forests: challenges and lessons learned", *Field Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 1628–1660, 2022.
- [8] N. Seegmiller and A. Kelly, "Enhanced 3D Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots", in *Robotics: Science and Systems X (RSS)*, Robotics: Science and Systems Foundation, 2014.
- [9] C. D. McKinnon and A. P. Schoellig, "Learn Fast, Forget Slow: Safe Predictive Learning Control for Systems With Unknown and Changing Dynamics Performing Repetitive Tasks", *IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)*, vol. 4, no. 2, pp. 2180–2187, 2019.
- [10] G. Huskić, S. Buck, and A. Zell, "A Simple and Efficient Path Following Algorithm for Wheeled Mobile Robots", in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 531, 2017, pp. 375–387.
- [11] S.-P. Deschenes, D. Baril, V. Kubelka, P. Giguere, and F. Pomerleau, "Lidar Scan Registration Robust to Extreme Motions", in *2021 18th Conference on Robots and Vision (CRV)*, IEEE, 2021, pp. 17–24.

- [12] T. Rouček, M. Pecka, P. Čížek, *et al.*, “System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge”, *Field Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 1779–1818, Mar. 2022.
- [13] C. Courcelle, D. Baril, F. Pomerleau, and J. Laconte, “On the Importance of Quantifying Visibility for Autonomous Vehicles Under Extreme Precipitation”, in *Towards Human-Vehicle Harmonization*, De Gruyter, 2023, pp. 239–250.