



Sylvie Putot, le 5 mai

# Validation en navigation sous-marine autonome

Eric Goubault, Luc Jaulin, Sylvie Putot

28 avril 2020

## 1 Contexte

La robotique mobile a fait de gros progrès ces dix dernières années principalement sur les questions d'autonomie et sur l'évolution dans des environnements incertains. Pour les petits robots (typiquement les aspirateurs ou les robots nettoyeurs), les algorithmes deviennent robustes grâce à un formalisme mathématique propre, une bonne prise en compte de l'incertitude et une simplicité des algorithmes utilisés [Jau15]. Cependant, les robots peuvent se perdre ou se bloquer dans quelques rares situations. Ces imperfections qui peuvent faire sourire pour des robots de petite taille ne sont plus acceptables dès que les robots deviennent plus gros, plus dangereux, plus chers ou plus polluants (voitures autonomes, cargos autonomes, etc).

On cherche à rendre les robots intègres [DB11] et à valider leur évolution. Pour cela, il convient de revoir les algorithmes composant l'intelligence du robot afin de les rendre plus simples et de pouvoir ainsi les valider plus facilement et sans rajouter des hypothèses de confort. Pour aller dans le sens de cette simplicité, une des pistes qui peut être retenue est le deep-learning qui permet une régulation simple et robuste de systèmes pouvant être très incertains. En ce qui concerne l'incertitude, les algorithmes existants reposent souvent sur une modélisation probabiliste de l'incertitude [TBF05]. Une validation pour des robots utilisant des algorithmes probabilistes (filtre de Kalman par exemple [Kal60]) est donc nécessaire.

## 2 Contexte particulier de la navigation sous-marine

Dans un environnement terrestre ou aérien, la navigation d'un robot mobile repose sur l'alternance entre localisation et régulation.

**Localisation** : Du fait de l'accès au GPS, ou de la présence d'amers en grand nombre, le robot peut se localiser de façon précise à chaque instant.

**Régulation** : Supposant que le robot connaît son état, le robot est capable d'agir sur ses actionneurs de façon à accomplir la mission demandée [FL01].

Sous l'eau, cette séparation entre estimation d'état et commande ne peut être faite. Une localisation précise est impossible car le robot est presque aveugle (il

ne voit souvent rien de significatif dans son environnement) et ne dispose pas du GPS. Les lois de commande existantes qui reposent sur une bonne connaissance de l'état ne sont généralement pas applicables [Cre14].

Pourtant, dans un tel contexte, il est fondamental de garantir qu'un robot sous marin sera capable d'accomplir sa mission sans exiger une localisation précise.

Dans cette thèse, nous allons chercher à concevoir des régulateurs capables de prendre en compte des incertitudes qui peuvent être très grandes et de différentes natures (ensemblistes et probabilistes). Les régulateurs que nous envisageons utiliser seront de nature bio-inspirée à base de réseaux de neurones. Ce choix nous semble bien adapté dans le cas d'une localisation très incertaine du fait de la capacité qu'ont les animaux marins à naviguer dans un tel contexte.

### 3 Validation et incertitudes

Pour la validation en robotique, la prise en compte des incertitudes est fondamentale. Souvent, on les considère ensemblistes [KJW02] car compatibles avec les algorithmes de preuve utilisés pour la validation. Pourtant les algorithmes ensemblistes et probabilistes qui sont implémentés dans les robots sont souvent très proches [FH82] [DWP00] [NJ18]. On peut alors combiner les incertitudes probabilistes et ensemblistes comme cela est fait dans les problèmes de détection de défauts [XJTMG13].

Cependant, le robot, qui est un véhicule couplé avec un filtre de Kalman ou autre algorithme avec des fondements probabilistes, reste un système déterministe. Une idée que nous voulons explorer serait de chercher à valider des algorithmes purement probabilistes en utilisant des techniques ensemblistes. Cette approche nous semble originale et adaptée car les algorithmes probabilistes fonctionnent de façon fiables et sont utilisés avec succès depuis de nombreuses années. Mais pour autant, seuls les algorithmes ensemblistes permettent de faire des preuves de façon numérique.

Une autre approche que nous voulons développer est de concevoir des méthodes à base de neurones pour le pilotage des robots mobiles. Les systèmes régulés qui en découlent ont une capacité d'adaptation surprenante face aux incertitudes. A nouveau, le robot couplé avec un algorithme neuronal reste un système déterministe que l'on peut valider pour des méthodes ensemblistes. Afin de rendre le processus de validation fonctionnel, il sera probablement indispensable de repenser les algorithmes neuronaux pour les rendre adaptés à la validation.

### 4 Proposition de sujet de thèse

Une approche classique pour le problème de la navigation dans un environnement bruité repose sur l'utilisation de filtres de Kalman. Cela suppose que le bruit de mesure est un bruit gaussien, et que le modèle dynamique du robot est connu précisément, pour faire l'étape de prédiction dans le filtre de Kalman.

En réalité, ceci est loin d'être vrai. Une approche proposée dans [CSC07] par exemple consiste en la représentation hybride du modèle dynamique du robot, avec une contribution classique modélisée par la physique, par systèmes différentiels, et une contribution modélisée par un réseau de neurones, compensant les termes physiques négligés, et l'imprécision dans la modélisation, des paramètres physiques du robot.

On se place donc dans le cadre d'algorithmes de prédiction-compensation, dans lesquels on se permet, à chaque itération, d'adapter la partie du modèle représentée par un réseau de neurones. On peut profiter d'algorithmes de navigation classiques pour entraîner ce réseau de neurones en utilisant des simulations.

Dans cette thèse, on souhaiterait poursuivre ces idées dans les directions suivantes:

- Adapter les algorithmes probabilistes comme le filtre de Kalman pour le rendre intègre, en utilisant des méthodes ensemblistes [KJW02], en prenant en compte l'évolution continue du robot.
- généraliser l'approche ensembliste à des cas de bruits modélisés par des probabilités imprécises (voir par exemple [ABG<sup>+</sup>13])
- valider la boucle de prédiction-estimation-contrôle, en présence du réseau de neurones compensateur, par des méthodes ensemblistes (à la DeepZ [SGM<sup>+</sup>18] ou à la Sherlock [DCJ<sup>+</sup>19] par exemple)
- étudier des méthodes ensemblistes qui pourraient remplacer la compensation par réseau de neurones. On pense en particulier aux méthodes de "myopic control" [OCIT19]

Une partie de ces résultats théoriques pourront être validés expérimentalement sur les robots sous-marins disponibles à l'ENSTA Bretagne.

## References

- [ABG<sup>+</sup>13] Assalé Adjé, Olivier Bouissou, Jean Goubault-Larrecq, Eric Goubault, and Sylvie Putot. Static analysis of programs with imprecise probabilistic inputs. In Ernie Cohen and Andrey Rybalchenko, editors, *Verified Software: Theories, Tools, Experiments - 5th International Conference, VSTTE 2013, Menlo Park, CA, USA, May 17-19, 2013, Revised Selected Papers*, volume 8164 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 22–47. Springer, 2013.
- [Cre14] V. Creuze. Robots marins et sous-marins ; perception, modélisation, commande. *Techniques de l'ingénieur*, 2014.
- [CSC07] M. Choi, R. Sakthivel, and W. K. Chung. Neural network-aided extended kalman filter for slam problem. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1686–1690, 2007.

- [DB11] V. Drevelle and P. Bonnifait. A set-membership approach for high integrity height-aided satellite positioning. *GPS Solutions*, 15(4):357–368, 2011.
- [DCJ<sup>+</sup>19] Souradeep Dutta, Xin Chen, Susmit Jha, Sriram Sankaranarayanan, and Ashish Tiwari. Sherlock - a tool for verification of neural network feedback systems: Demo abstract. In *Proceedings of the 22nd ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, HSCC '19, page 262–263, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [DWP00] C. Durieu, E. Walter, and B. Polyak. Set-membership estimation with the trace criterion made simpler than with the determinant criterion. In *CD-Rom of the IFAC Symp. on System Identification*, 2000.
- [FH82] E. Fogel and Y. F. Huang. On the value of information in system identification - bounded noise case. *Automatica*, 18(2):229–238, 1982.
- [FL01] I. Fantoni and R. Lozano. *Non-linear control for underactuated mechanical systems*. Springer-Verlag, 2001.
- [Jau15] L. Jaulin. *Mobile Robotics*. ISTE editions, 2015.
- [Kal60] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the AMSE, Part D, Journal of Basic Engineering*, 82:35–45, 1960.
- [KJW02] M. Kieffer, L. Jaulin, and E. Walter. Guaranteed recursive nonlinear state bounding using interval analysis. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 16:193–218, 2002.
- [NJ18] J. Nicola and L. Jaulin. Comparison of kalman and interval approaches for the simultaneous localization and mapping of an underwater vehicle. *Special Issue on Ocean Engineering and Oceanography*, Springer, 2018.
- [OCIT19] Melkior Ornik, Steven Carr, Arie Israel, and Ufuk Topcu. Myopic control of systems with unknown dynamics. In *2019 American Control Conference, ACC 2019, Philadelphia, PA, USA, July 10-12, 2019*, pages 1064–1071. IEEE, 2019.
- [SGM<sup>+</sup>18] Gagandeep Singh, Timon Gehr, Matthew Mirman, Markus Püschel, and Martin T. Vechev. Fast and effective robustness certification. In Samy Bengio, Hanna M. Wallach, Hugo Larochelle, Kristen Grauman, Nicolò Cesa-Bianchi, and Roman Garnett, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 31: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2018*,

*NeurIPS 2018, 3-8 December 2018, Montréal, Canada*, pages 10825–10836, 2018.

- [TBF05] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, Cambridge, M.A., 2005.
- [XJTMG13] J. Xiong, C. Jauberthie, L. Travé-Massuyes, and F. Le Gall. Fault detection using interval kalman filtering enhanced by constraint propagation. In *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on*, pages 490–495. IEEE, 2013.