

Sujet de thèse

Titre de la thèse : Apprentissage Naïf de Modèles Causaux du Monde

Directrice ou directeur de thèse : Sylvain Argentieri

Collaboration dans le cadre de la thèse : Louis Annabi

Laboratoire d'accueil : ISIR (*Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique*), Campus Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris.

Personne à contacter

Prénom Nom : Sylvain Argentieri

Tel : +33 1 44 27 63 55

Email : sylvain.argentieri@sorbonne-universite.fr

Envoyer votre candidature par mail, avec [*sujet de la thèse*] en objet, un CV, une lettre de motivation, et vos relevés de notes.

Date limite de dépôt de la candidature : 21/05/2024

Description du sujet (en français)

Contexte :

La thèse de doctorat proposée sera menée au sein de l'équipe ASIMOV au laboratoire ISIR. Cette équipe étudie la perception et le contrôle des robots, ou plus généralement des systèmes intelligents, dans des environnements ouverts. En robotique traditionnelle, l'approche consiste à programmer les robots avec des modèles prédéfinis de leurs capteurs, de leurs actionneurs et de leur environnement. En revanche, en apprentissage automatique et en intelligence artificielle, le domaine de la robotique développementale cherche à doter les robots de la capacité d'apprendre de leur environnement de manière autonome, en reproduisant les mécanismes de développement observés chez les humains et autres organismes vivants.

Dans la théorie du développement cognitif de Piaget, la première étape permet aux enfants (dans notre contexte, les robots et systèmes intelligents) de se construire progressivement une compréhension du monde en coordonnant leurs expériences sensorielles avec l'interaction physique avec leur environnement. Les travaux menés au sein de l'équipe ASIMOV sur ces sujets ont d'abord consisté à formaliser, mathématiquement et de manière algorithmique, les processus qui permettent à un agent totalement naïf –c'est à dire sans connaissances a priori sur sa structure cinématique ni sur son environnement– d'extraire la structure de l'espace physique dans lequel il est immergé. Ceci est rendu possible par la corrélation entre ses actions motrices et l'information obtenue par ses capteurs. Dans le contexte de la théorie sensorimotrice de la perception telle que décrite par Kevin O'Regan [1], une telle structure extraite de sensations brutes non interprétées peut découler naturellement sur la notion de perception de l'espace. Depuis, cette approche développementale et sensorimotrice a permis de construire des agents naïfs capables de découvrir d'autres propriétés de leur environnement telles que l'espace physique [2], le schéma corporel [3], la structure des actions [4] ou la notion d'objet [5].

Sous la co-tutelle de :

Description du projet :

La thèse proposée vise à explorer l'apprentissage autonome de modèles adaptatifs du monde grâce à l'interaction sensori-motrice avec l'environnement. Le terme modèle du monde [6] englobe à la fois l'identification de variables latentes interprétables pour décrire l'environnement (c'est-à-dire trouver une représentation d'état désenchevêtrée qui sépare les facteurs individuels de variation de l'environnement) et la prédiction de l'évolution de ces variables dans le temps en réponse à l'action de l'agent (c'est-à-dire apprendre la fonction de transition d'un processus de décision markovien). De tels modèles reflètent la compréhension de l'environnement par l'agent et peuvent être utilisés dans des algorithmes d'apprentissage par renforcement model-based pour guider son comportement. Des recherches ont indiqué que les modèles incorporant efficacement la structure causale de l'environnement démontrent une adaptabilité accrue aux changements de distribution, améliorant ainsi l'adaptabilité des robots et des systèmes intelligents [7]. Ainsi, cette thèse s'intéresse à l'apprentissage de modèles du monde sous l'angle de la causalité. L'objectif est de contribuer aux domaines de la découverte causale et de l'apprentissage de représentation causale dans le contexte de la robotique développementale.

Les premières orientations de recherche consisteront à étudier les liens entre l'apprentissage de représentations causales [8] et d'autres approches pour l'apprentissage de représentations désenchevêtrées [9], et à explorer comment l'agentivité des systèmes intelligents peut être exploitée pour améliorer l'apprentissage de modèles du monde, par exemple en définissant des motivations intrinsèques pertinentes [10, 11]. Les algorithmes proposés seront basés sur des réseaux de neurones artificiels et seront validés d'abord dans des environnements simulés et, si les résultats obtenus le permettent, sur des plateformes robotiques simples.

Profil recherché :

- Un goût pour la recherche fondamentale
- Formation (M2 ou diplôme d'ingénieur) en informatique ou robotique

Compétences requises :

- Connaissances en apprentissage / intelligence artificielle
- Bon niveau de programmation en Python
- Bon niveau d'anglais

[1] O'Regan, J.K. and Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24:939-1031.

[2] Laflaquière, A., O'Regan, J. K., Gas, B., & Terekhov, A. (2018). Discovering space—Grounding spatial topology and metric regularity in a naive agent's sensorimotor experience. *Neural Networks*, 105, 371-392.

[3] Marcel, V., Argentieri, S., & Gas, B. (2019). Where do I move my sensors? Emergence of a topological representation of sensors poses from the sensorimotor flow. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 13(2), 312-325.

[4] Godon, J. M., Argentieri, S., & Gas, B. (2020). A formal account of structuring motor actions with sensory prediction for a naive agent. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 561660.

[5] Le Hir, N., Sigaud, O., & Laflaquière, A. (2018). Identification of invariant sensorimotor structures as a prerequisite for the discovery of objects. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 70.

[6] Ha, D., & Schmidhuber, J. (2018). World models. *arXiv preprint arXiv:1803.10122*.

[7] Richens, J., & Everitt, T. (2024). Robust agents learn causal world models. *arXiv preprint arXiv:2402.10877*.

Sous la co-tutelle de :

- [8] Lachapelle, S., Rodriguez, P., Sharma, Y., Everett, K. E., Le Priol, R., Lacoste, A., & Lacoste-Julien, S. (2022, June). Disentanglement via mechanism sparsity regularization: A new principle for nonlinear ICA. In Conference on Causal Learning and Reasoning (pp. 428-484). PMLR.
- [9] Caselles-Dupré, H., Garcia Ortiz, M., & Filliat, D. (2019). Symmetry-based disentangled representation learning requires interaction with environments. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.
- [10] Oudeyer, P. Y., & Kaplan, F. (2007). What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches. *Frontiers in neurorobotics*, 1, 108.
- [11] Annabi, L. (2022). Intrinsically Motivated Learning of Causal World Models. Fifth International Workshop on Intrinsically-Motivated Open-ended Learning (IMOL2022).

Description du sujet (en anglais)

Thesis title: Naïve Learning of Causal Models of the World

Context:

The proposed PhD thesis will be conducted within the ASIMOV team at the ISIR lab. This team studies the perception and control of robots, or more generally of intelligent systems, in open-ended environments. In traditional robotics, the common approach involves programming robots with predefined models of their sensors, actuators, and environment. In contrast in machine learning and artificial intelligence, the field known as developmental robotics aspires to endow robots with the capacity to autonomously learn about themselves and their surroundings, mirroring the developmental processes observed in humans and other living organisms.

In Piaget's theory of cognitive development, the first stage allows infants (in our context robots and intelligent systems) to progressively construct knowledge and understanding of the world by coordinating sensory experiences with physical interaction with their surroundings. The work carried out within the ASIMOV team on these subjects initially involved formalizing, mathematically and algorithmically, the processes that allow a completely naive agent – that is, one without any prior knowledge of its kinematic organization or its environment – to extract the structure of the physical space in which it is immersed. This is made possible by the correlation between its motor actions and the information obtained by its sensors. In the context of the sensorimotor theory of perception described by Kevin O'Regan [1], such a structure can be extracted from raw, uninterpreted sensations and can naturally lead to the notion of space perception. Since then, this developmental and sensorimotor approach has enabled the construction of naive agents capable of discovering other properties of their environment such as physical space [2], body schema [3], action structure [4], or the notion of objects [5].

Project Description:

The proposed thesis seeks to explore the autonomous learning of adaptive world models through sensorimotor interaction with the environment. The term world model [5] encompasses both the identification of meaningful latent variables to describe the environment (i.e. finding a disentangled state representation that separates individual factors of environmental variation), and the prediction of the evolution of those variables over time in response to the agent's action (i.e. learning the transition function of a markov decision process). Such models reflect the agent's understanding of its environment and can be utilized in model-based reinforcement learning algorithms to guide its behavior. Research has indicated that models effectively incorporating the causal structure of the environment demonstrate enhanced adaptability to distribution shifts, thus improving the adaptability of robots and intelligent systems [6]. This thesis aims at contributing to the domains of causal discovery and causal representation learning in the context of developmental robotics.

Sous la co-tutelle de :

Initial research directions will involve studying the connections between causal [7] and other disentangled representation learning frameworks [8], and exploring how the agency of intelligent systems can be leveraged to enhance the learning of world models, for instance through specially designed intrinsic motivations [9, 10]. The proposed algorithms will be based on artificial neural networks for function approximation, and validated in simulated environments.

Required Profile:

- A passion for fundamental research
- Education (Master's degree or engineering degree) in computer science or robotics

Required skills:

- Knowledge in machine learning / artificial intelligence
- Proficiency in Python programming
- Fluent in English

[1] O'Regan, J.K. and Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24:939-1031.

[2] Laflaquière, A., O'Regan, J. K., Gas, B., & Terekhov, A. (2018). Discovering space—Grounding spatial topology and metric regularity in a naive agent's sensorimotor experience. *Neural Networks*, 105, 371-392.

[3] Marcel, V., Argentieri, S., & Gas, B. (2019). Where do I move my sensors? Emergence of a topological representation of sensors poses from the sensorimotor flow. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 13(2), 312-325.

[4] Godon, J. M., Argentieri, S., & Gas, B. (2020). A formal account of structuring motor actions with sensory prediction for a naive agent. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 561660.

[5] Le Hir, N., Sigaud, O., & Laflaquière, A. (2018). Identification of invariant sensorimotor structures as a prerequisite for the discovery of objects. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 70.

[6] Ha, D., & Schmidhuber, J. (2018). World models. *arXiv preprint arXiv:1803.10122*.

[7] Richens, J., & Everitt, T. (2024). Robust agents learn causal world models. *arXiv preprint arXiv:2402.10877*.

[8] Lachapelle, S., Rodriguez, P., Sharma, Y., Everett, K. E., Le Priol, R., Lacoste, A., & Lacoste-Julien, S. (2022, June). Disentanglement via mechanism sparsity regularization: A new principle for nonlinear ICA. In *Conference on Causal Learning and Reasoning* (pp. 428-484). PMLR.

[9] Caselles-Dupré, H., Garcia Ortiz, M., & Filliat, D. (2019). Symmetry-based disentangled representation learning requires interaction with environments. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.

[10] Oudeyer, P. Y., & Kaplan, F. (2007). What is intrinsic motivation? A typology of computational approaches. *Frontiers in neurorobotics*, 1, 108.

[11] Annabi, L. (2022). Intrinsically Motivated Learning of Causal World Models. *Fifth International Workshop on Intrinsically-Motivated Open-ended Learning (IMOL2022)*.