

Sujet de thèse

Compagnon Virtuel de Maintenance par une Réalité Augmentée Personnalisée

1 - Contexte

La thèse de doctorat proposée a pour contexte l'aide à la maintenance industrielle par la réalité augmentée. Elle s'inscrit dans le cadre du projet VIMACO, labellisé par l'ANR à travers l'appel à projet de recherche collaborative avec l'entreprise en 2021 (projet d'une durée de 4 ans). Le projet VIMACO (pour Virtual Maintenance Companion) vise à favoriser la transmission de connaissances et compétences entre opérateurs experts et novices à travers un ensemble de technologies associant l'observation de l'opérateur, l'intelligence artificielle et la réalité augmentée.

Le projet VIMACO a pour objectif de développer des méthodes et outils de réalité augmentée personnalisée pour l'assistance à la maintenance industrielle. Il s'agit d'un projet de recherche collaborative entreprise (PRCE) associant les laboratoires LiSPEN (sciences de l'ingénieur en immersion virtuelle et intelligence artificielle) et CAPS (sciences de la cognition) et les entreprises DIOTA (PME en technologies de la réalité augmentée pour l'industrie) et SAFRAN (grand groupe de l'industrie aéronautique). La maintenance industrielle est un domaine pour lequel les compétences humaines sont précieuses et les opérations complexes. La littérature scientifique dans le domaine de l'assistance à la maintenance par la réalité augmentée fait état de travaux sur la valeur ajoutée de la réalité augmentée, la capture et l'analyse du geste humain ainsi que l'analyse de procédure de maintenance basée sur le système. Peu de travaux s'intéressent à l'opérateur, son niveau d'expertise et les informations adaptées à sa tâche. Le projet VIMACO a pour ambition d'apporter une assistance personnalisée à l'opérateur de maintenance. Les problématiques scientifiques identifiées sont liées à l'analyse du comportement afin d'extraire un squelette de la procédure de maintenance, la connaissance du niveau d'expertise et des singularités motrices de l'opérateur ainsi que les techniques de guidage interactif en réalité augmentée. Trois questions de recherche sont traitées dans le cadre de ce projet : Comment extraire une procédure de maintenance par l'analyse des mouvements d'un opérateur expert ? Comment extraire les singularités motrices d'un opérateur standard et en déduire son niveau d'expertise afin de mieux le guider ? Quels sont les retours sensoriels à apporter à un opérateur standard en fonction de l'information manquante juste nécessaire ?

2 - Problématiques

Au sein du projet VIMACO, la thèse de doctorat proposée s'attachera plus particulièrement à la recherche de méthodes et outils permettant de capitaliser les connaissances et savoir-faire des opérations de maintenance industrielle en vue d'apporter les informations nécessaires adaptées à l'opérateur dans le système de guidage par réalité augmentée. Les problématiques sont ainsi liées à l'extraction du niveau d'expertise et des singularités motrices de l'opérateur ainsi que les retours sensoriels justes nécessaires à apporter à l'opérateur en réalité augmentée en fonction de l'information manquante.

3 - Etat de l'art

L'immersion virtuelle par la réalité virtuelle et augmentée est par essence très dépendante de la perception du sujet. Aussi, il existe de nombreuses expériences d'immersion virtuelle pour lesquelles des différences de perception entre les sujets sont observées (cybersickness, motion sickness, comportement). De nombreux

facteurs [Ijs00] peuvent expliquer cela (âge, expérience, capacités cognitives et motrices...). Aussi, l'adaptation personnalisée des modalités d'interaction fait l'objet de travaux de recherche concernant principalement la simulation de conduite (pour éviter le mal des simulateurs) [Cle19] et l'interaction en réalité virtuelle [Mic20] [Plo18]. Cependant, peu de travaux existent sur l'adaptation personnalisée des interactions en réalité augmentée. Il est également observé que la multisensorialité peut améliorer l'immersion virtuelle lorsqu'elle est adaptée au sujet [Tri19].

La maintenance est un axe d'amélioration important dans l'industrie 4.0 en raison de la complexité et de la diversité des tâches et de la transmission des compétences entre experts et novices [Dam18] [Gat19] [Scu18]. [Cha17] propose des méthodes et des outils de démontage par RA en deux étapes (détection d'une séquence d'états et d'actions à partir d'une analyse des interactions possibles entre les pièces, puis RA pour fournir un guidage). L'expertise de l'opérateur n'est pas prise en compte (approche centrée sur le système). [Syb16] propose des instructions dynamiques pour les opérations de maintenance données à l'opérateur en fonction d'un système expert basé sur des règles. Les règles du système expert sont alimentées par un expert hors ligne et manuellement. L'intelligence artificielle (IA) est une technologie prometteuse pour améliorer les opérations dans l'industrie [Fah20]. Les travaux de recherche récents sur l'utilisation de l'IA pour la maintenance sont surtout menés pour faire de la reconnaissance de situation sur les équipements [Mou20] [Buk20].

L'analyse du mouvement humain fait l'objet de nombreux travaux [Adi20] [Ben17]. Certains sont appliqués dans le domaine de la rééducation fonctionnelle notamment mais aussi industriels pour des études d'ergonomie des postes de travail. De nombreux travaux ont été réalisés sur la capture et l'analyse des gestes en utilisant des techniques sophistiquées de classification ou d'intelligence artificielle [Kow21] [Yan19] [Adi20] ou en présentant une approche topologique de la reconnaissance de gestes humains via la persistance homologique dont les résultats sont déjà très prometteurs [Dir16],[Zel21]. [Mal21] a étudié le jumeau numérique d'un couple humain-robot afin de détecter les conflits potentiels pour programmer le mouvement du robot. Pour cela, un mannequin virtuel, contrôlé par une capture de mouvement experte, est utilisé. Récemment, [Num20] a développé un travail visant à créer une base de données de connaissances des gestes de la main dans les tâches de maintenance. Le projet européen WEKIT a développé un cadre pour enregistrer un mouvement expert et le restituer à un apprenti. Un état de l'art intéressant a été fait concernant les systèmes de RA basés sur des capteurs [Lim18], montrant des goulots d'étranglement dans la modélisation des processus cognitifs, la mesure de l'état émotionnel de l'opérateur ainsi que la capture des performances des experts. Depuis quelques années, plusieurs travaux ont mis en évidence l'existence de singularités motrices dans le mouvement humain [Hil16]. Dans la littérature, cependant, très peu de travaux concernent l'analyse de l'opérateur et de son niveau d'expertise.

4 - Verrous scientifiques

Afin d'atteindre les objectifs de la thèse, les verrous scientifiques suivants ont été identifiés :

- **Verrou scientifique 1 : classification en différents niveaux d'expertise.** L'ambition liée à ce verrou est de développer des méthodes et outils permettant d'extraire une classification des signatures de mouvements en différentes classes de niveaux d'expertise. Des méthodes et des outils seront développés pour distinguer des classes de niveaux d'expertise (par exemple 5 classes) construites à partir de données sur les mouvements (trajectoires de la main, regard) et la performance de la tâche (vitesse d'exécution, précision du geste, séquence de mouvement) d'un ensemble significatif d'opérateurs humains. Afin de faciliter ce travail de classification, nous faisons l'hypothèse qu'une expérimentation en immersion virtuelle de l'ensemble de la tâche de maintenance permet de construire cette classification. Pour valider l'utilisation de la réalité virtuelle dans cette étude, des comparaisons expérimentales seront effectuées sur des cas représentatifs entre le modèle physique et son équivalent en modèle virtuel. La classification sera mise en œuvre à l'aide d'une analyse élaborée des données utilisant des techniques d'intelligence artificielle (méthodes d'apprentissage automatique).
- **Verrou scientifique 2 : extraction du profil de l'opérateur.** En lien avec le verrou précédent, des méthodes et outils seront consacrés à l'extraction de la spécificité du comportement de l'opérateur par rapport à sa stratégie de réalisation de la tâche. Cela permettra de déterminer le modèle expert le plus approprié à suivre

pour le guidage à effectuer. Cela concerne des préférences possibles de l'opérateur en terme de retours d'informations (visuelles, tactiles, sonore) par rapport à son approche proprioceptive lors de l'opération.

- **Verrou scientifique 3 : Informations multi-sensorielles en réalité augmentée pour le guidage personnalisé.** Ce verrou consiste à étudier et proposer les informations pertinentes pour le guidage personnalisé de l'opérateur en fonction de son niveau d'expertise et de son profil stratégique (gradation entre une approche visuelle et une approche proprioceptive). Ces informations seront constituées d'un niveau de guidage et d'un type de retour sensoriel (couplage visuo-haptique et poids relatifs des modalités).

Les verrous technologiques suivants seront également étudiés dans le cadre de cette thèse :

- **Verrou technologique 1 : analyse en temps réel du niveau d'expertise de l'opérateur.** Des méthodes et outils seront développés pour extraire en temps réel les paramètres les plus pertinents des mouvements de l'opérateur qui serviront à identifier son niveau d'expertise (par comparaison avec les classes d'expertise préalablement déterminées). L'homologie persistante mise à contribution pour extraire des descripteurs topologiques des données dynamiques analysées sera combinée avec des méthodes d'Intelligence Artificielle afin de discriminer les opérateurs selon leur niveau d'expertise.
- **Verrou technologique 2 : démonstrateur technologique.** Un démonstrateur technologique sera réalisé pour ces travaux de recherche. Il est envisagé de développer un démonstrateur en réalité virtuelle mais une version en réalité augmentée pourra faire l'objet de développement spécifique en fonction de l'avancée des travaux.

5 - Approche proposée

L'approche proposée suivra les étapes suivantes :

- Etat de l'art lié aux problématiques
- Etudes des verrous scientifiques et expressions des questions de recherche
- Propositions d'expérimentations et protocoles expérimentaux
- Développement de démonstrateurs technologiques sur des scénarii représentatifs
- Expérimentations et analyse de données pour validation des propositions
- Publications

6 - Résultats attendus

Les résultats attendus de ces travaux de recherche sont les suivants :

- Démonstrateurs technologiques
- Evaluations en laboratoire
Publications dans des conférences internationales et dans des journaux à comité de lecture
- Communications en séminaires internes, réunions internes
- Manuscrit de thèse et soutenance finale

7 - Lieu de réalisation des travaux

Les travaux seront réalisés sur le site du laboratoire LISPEN de Chalon-sur-Saône.

8 - Contacts

- Christophe Guillet (christophe.guillet@ensam.eu)
- Frédéric Merienne (frederic.merienne@ensam.eu)
- Aylén Ricca (aylen.ricca@ensam.eu)

9 - Bibliographie

- [Adi20] Adithya V., Rajesh R., A Deep Convolutional Neural Network Approach for Static Hand Gesture Recognition, *Procedia Computer Science*, Volume 171, 2020, Pages 2353-2361, ISSN 1877-0509.
- [Ben17] Bensekka C., Guillet C., Merienne F., Pozzo T. A topological approach for human movement classification and anticipation. In *Gait & Posture*, volume 57, pages 229–230, Trondheim, Norway, September 2017. Elsevier.
- [Buk20] Bukhsh ZA., Stipanovic I., Saeed A., Doree A., Maintenance intervention predictions using entity-embedding neural networks, *Automation in Construction*, Volume 116, 2020, 103202, ISSN 0926-5805.
- [Cha17] M.M.L. Chang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee, AR-guided Product Disassembly for Maintenance and Remanufacturing, *Procedia CIRP*, Volume 61, 2017, Pages 299-304, ISSN 2212-8271.
- [Cle19] Cleij D., Venrooij J., Pretto P., Katliar M., Bülthoff HH., Steffen D., Hoffmeyer FW., Schöner HP., Comparison between filter- and optimization-based motion cueing algorithms for driving simulation, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Volume 61, 2019, Pages 53-68, ISSN 1369-8478.
- [Dam18] Damiani L., Demartini M., Guizzi G., Revetria R., Tonelli F. Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51, Issue 11, 2018, Pages 624-630, ISSN 2405-8963.
- [Dir16] A. Dirafzoon, N. Lokare and E. Lobaton, "Action classification from motion capture data using topological data analysis," *2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, 2016, pp. 1260-1264, doi: 10.1109/GlobalSIP.2016.7906043.
- [Fah20] Fahle S., Prinz C., Kuhlenkötter B. Systematic review on machine learning (ML) methods for manufacturing processes – Identifying artificial intelligence (AI) methods for field application. *Procedia CIRP Vol 93*, 2020, Pages 413-418, Elsevier B.V.
- [Gat19] Gattullo M., Scurati G., Fiorentino M., Uva AE., Ferrise F., Bordegoni M. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 56, 2019, Pages 276-286.
- [Hil16] Hilt P., Berret B., Papaxanthis C. et al. Evidence for subjective values guiding posture and movement coordination in a free-endpoint whole-body reaching task. *Sci Rep* 6, 23868 (2016).
- [Ijs00] Ijsselstein, Wijnand & Ridder, Huib & Freeman, Jonathan & Avons, Steve. (2000). Presence: Concept, determinants and measurement. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 3959. 10.1117/12.387188.
- [Kow21] Kowdiki M., Khaparde A., Automatic hand gesture recognition using hybrid meta-heuristic-based feature selection and classification with Dynamic Time Warping, *Computer Science Review*, Volume 39, 2021, 100320, ISSN 1574-0137.
- [Lim18] Limbu BH., Jarodzka H., Klemke R., Specht M., Using sensors and augmented reality to train apprentices using recorded expert performance: A systematic literature review, *Educational Research Review*, Volume 25, 2018, Pages 1-22, ISSN 1747-938X.
- [Mal21] Malik AA., Brem A., Man, machine and work in a digital twin setup: a case study, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 2021, 102092, ISSN 0736-5845.
- [Mic20] Mici L., Parisi Gl., Wermter S. A self-organizing neural network architecture for learning human-object interactions, *Neurocomputing*, Volume 307, 2018, Pages 14-24, ISSN 0925-2312.
- [Mou20] Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. A Framework for Automatic Generation of Augmented Reality Maintenance & Repair Instructions based on Convolutional Neural Networks, *Procedia CIRP*, Volume 93, 2020, Pages 977-982, ISSN 2212-8271.
- [Num20] Numfu M., Riel A., Noël F., Virtual reality based digital chain for creating a knowledge base of hand gestures in maintenance tasks, *Procedia CIRP*, Volume 90, 2020, Pages 648-653, ISSN 2212-8271.
- [Plo18] Plouzeau, J., Chardonnet, J., Merienne, F. Using cybersickness indicators to adapt navigation in virtual reality: a pre-study. In *IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 661–662, Reutlingen, Germany, 03/2018.

- [Scu18] Scurati GW., Gattullo M., Fiorentino M., Ferrise F., Bordegoni M., Uva AE. Converting maintenance actions into standard symbols for Augmented Reality applications in Industry 4.0, *Computers in Industry*, Volume 98, 2018, Pages 68-79.
- [Syb16] Syberfeldt A., Danielsson O., Holm M., Wang L., Dynamic Operator Instructions Based on Augmented Reality and Rule-based Expert Systems, *Procedia CIRP*, Volume 41, 2016, Pages 346-351, ISSN 2212-8271.
- [Tri19] Tripicchio P., Avizzano CA., Bergamasco M., A 6-DOF haptic manipulation system to verify assembly procedures on CAD models, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, 2019, Pages 1292-1299, ISSN 2351-9789.
- [Yan19] Yan Y., Yi X., Yu C., Shi Y., Gesture-based target acquisition in virtual and augmented reality, *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Volume 1, Issue 3, 2019, Pages 276-289, ISSN 2096-5796.
- [Zel21] Żelawski, M., Hachaj, T. (2021). The application of topological data analysis to human motion recognition. *Technical Transactions*: e2021011. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2021011>