Intitulé de l'Unité d'Enseignement (UE) : Estimation et identification pour la Robotique et les systèmes dynamiques

Responsable de l'UE : Nazih MECHBAL (nazih.mechbal@ensam.eu)
Code UE :
Volumes horaires / étu : 32 h Cours, 12 h TD, 12 h TP
Nombre de crédits de l'UE/EC : 6 ECTS
Parcours-type : ☒ ROBOT ☐ SI ☐ MeDH
Semestre où l'enseignement est proposé : ☐ S1 ☐ S2 ☒ S3 ☐ S4
Langue d'enseignement : ☒ Français ☐ Anglais
Public concerné : ☐ Département SDI ☒ Autre (préciser) : ENSAM
Localisation : ☐ Campus PMC ☐ Autre (préciser) : Campus ENSAM Paris

Thématique

Ce cours présente les fondamentaux de l'estimation et de l'identification paramétrique des systèmes dynamiques à partir de données expérimentales, avec un fort accent sur les applications robotiques (robots industriels, drones autonomes, etc.). Il couvre les principales méthodologies d'estimation des états de systèmes multiphysiques et d'identification des paramètres physiques de systèmes robotiques à partir de mesures d'entrée-sortie. Le cours aborde des aspects essentiels tels que le traitement du signal, la conception de modèles et l'estimation de paramètres. Des techniques avancées d'estimation d'état sont étudiées, notamment le filtre de Kalman et ses extensions non linéaires : filtre de Kalman étendu (EKF), filtre de Kalman sans parfum (UKF), filtre particulaire (PF), ainsi que des approches modernes fondées sur l'apprentissage, telles que le filtre de Kalman neuronal (NKF). Les méthodes d'estimation conjointe des états et des paramètres sont également introduites au moyen de formulations à état augmenté. Le cours passe en revue les fondamentaux du traitement du signal pour l'identification des systèmes (analyse en temps discret, filtrage numérique, méthodes spectrales) et les étend au traitement non linéaire du signal ainsi qu'aux approches pilotées par les données et fondées sur l'intelligence artificielle. Enfin, le cours étudie le problème spécifique de l'identification paramétrique des manipulateurs robotiques flexibles, avec des applications à l'usinage robotisé et à des systèmes expérimentaux réels. Toutes les méthodes sont illustrées par des mises en œuvre pratiques à l'aide d'outils logiciels dédiés (MATLAB/Octave, Python), en mettant l'accent sur les données réelles et les applications d'ingénierie. Une attention particulière est portée à la mise en œuvre et aux applications sur des systèmes robotiques réels.

Mots-clés : Estimation d'état, identification paramétrique, modélisation pilotée par les données, estimation bayésienne récursive, filtres de Kalman, estimations non linéaires, traitement du signal, usinage robotisé, manipulateurs robotiques flexibles

Prérequis

Afin de suivre cette UE, doivent être acquis précédemment :

- Algèbre linéaire et notions fondamentales de théorie de la commande
- Systèmes dynamiques à temps continu et discret (représentation d'état)
- Probabilités et variables aléatoires
- Fondamentaux du traitement du signal
- Mécanique des solides et vibrations
- Compétences de base en programmation (Matlab ou Python)

Acquis d'apprentissage visés (AAV)

À l'issue de cette UE, les étudiantes ou étudiants seront capables de :

1. Revoir la théorie des probabilités et l'inférence bayésienne.
2. Comprendre les principales méthodes d'estimation linéaire et en présenter les propriétés.
3. Calculer des estimations par moindres carrés et moindres carrés récursifs (RLS).

4. Concevoir et mettre en œuvre un filtre de Kalman (KF) et un KF en régime permanent, utilisé comme observateur d'état, sous Matlab/Octave.
5. Concevoir et mettre en œuvre des filtres de Kalman non linéaires (EKF, UKF).
6. Comprendre l'estimation bayésienne récursive pour les systèmes non linéaires et non gaussiens.
7. Concevoir et mettre en œuvre un filtre particulaire sous Matlab/Octave.
8. Comprendre le filtre de Kalman neuronal (NKF).
9. Concevoir la chaîne de traitement du signal afin d'acquérir des données fiables dans un contexte robotique.
10. Identifier des modèles paramétriques (ARX, ARMAX, etc.) à partir de données expérimentales.
11. Appliquer des approches pilotées par les données et d'apprentissage automatique à l'identification des systèmes dans un contexte robotique.
12. Réaliser la modélisation dynamique d'un robot industriel en tenant compte de ses flexibilités et identifier ses paramètres ; Traiter des signaux expérimentaux numériques acquis sur un robot industriel réel présentant des flexibilités.

Séquencement et modalités de l'enseignement (indicatif)

Semaine	C/TD/TP	Contenu	Préparation	AAV associé(s)
S1	C	Théorie des probabilités et inférence bayésienne	Révision des bases des probabilités	AAV1
S2	C+TD	Estimation par moindres carrés, maximum de vraisemblance (ML) et maximum a posteriori (MAP)	Exercices sur les méthodes d'estimation	AAV2, AAV3
S3	C+TD	Estimation récursive (RLS)	Exercices de mise en œuvre	AAV3
S4	C+TD/TP Num	Filtre de Kalman (KF)	Mise en œuvre du KF sous Matlab	AAV4
S5	C+TD/TP Num	Filtres de Kalman étendu et sans parfum (EKF, UKF)	Exercices d'estimation non linéaire	AAV5, AAV6
S6	C+Examen	Filtres particulaires (cours court) + examen écrit de mi-semestre	Révisions	AAV1-AAV5
S7	C	Limites de l'estimation fondée sur un modèle	Discussion et études de cas	AAV6
S8	C	Filtre de Kalman neuronal (NKF)	Introduction et exemples de mise en œuvre	AAV8
S9	C+TD/TP Num	Estimation hybride (KF ou NKF)	Travail en mode projet	AAV4
S10	C+TD/TP Num	Traitement avancé du signal pour la robotique	Introduction au traitement du signal et mise en œuvre	AAV4
S11	C+TD/TP Num	Identification paramétrique (modèles ARX, ARMAX, etc.)	Exercices sur la structure des modèles	AAV9, AAV11
S12	C+TD/TP Num	Identification pilotée par les données	Comparaison avec les modèles paramétriques	AAV12
S13	Examen	Examen écrit final (estimation et identification)	Révisions	AAV1-AAV12
S14	C	Modélisation de manipulateurs robotiques flexibles	Révision de la dynamique des robots	AAV12
S15 et S16	TP/DM	Identification de manipulateurs robotiques flexibles	Analyse de données expérimentales / Travail en mode projet	AAV12

Modalités d'évaluation des acquis d'apprentissage (1ère session)

Semaine	Indiv/collectif	Présentiel/distanciel	Type d'examen	AAV évalué(s)	Barème %
S6	Individuel	Présentiel	Examen écrit de mi-semestre (méthodes d'estimation)	AAV1-AAV5	40 %
S12	Individuel	Présentiel	Examen écrit final (estimation et identification)	AAV1-AAV12	30 %
S15	Collectif	Présentiel	Travail pratique / mini-projet (identification et estimation d'un système robotique)	AAV8-AAV15	30 %

2nde session

Session	Indiv/collectif	Présentiel/distanciel	Type d'examen	AAV évalué(s)	Barème %

Références bibliographiques

— Lennart Ljung, System Identification : Theory for the User, 2nd ed. Prentice Hall, 1999.
— T. Kailath, A. Sayed, and B. Hassibi, Linear Estimation, Prentice Hall, 2000.
— G. Revach et al., KalmanNet : Neural Network Aided Kalman Filtering, 2021.
— R. Krishnan et al., Deep Kalman Filters, 2017.
— Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schafer, and John R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J : Prentice Hall, 1999.

Date de génération de la fiche d'UE : 6 octobre 2026