

S2I

Présentation du sujet

L'épreuve de Sciences Industrielles de l'Ingénieur de la session 2019 a pour contexte la chirurgie mini-invasive robotisée avec stabilisation des mouvements physiologiques. C'est un thème d'actualité se situant en partie dans le domaine de la recherche tant du point de vue médical que de celui de la robotique.

La problématique du sujet porte sur la compensation des mouvements physiologiques (respiratoires ou cardiaques par exemple) des patients lors d'opérations en chirurgie télé-opérée. Ce type de système est composé d'un robot maître et d'un robot esclave. Le robot maître, piloté directement par le chirurgien, permet de générer les consignes de déplacement du robot esclave qui, ainsi, reproduit les gestes du chirurgien. La particularité du système, objet de l'étude, est d'ajouter d'une façon synchrone à ces consignes issues du geste du chirurgien les mouvements physiologiques du patient dans la génération des consignes de déplacement du robot esclave. Cet ajout place le chirurgien dans un environnement virtuel d'opération qu'il perçoit comme dans un repère fixe.

Le sujet est construit en quatre parties selon un fil conducteur menant le candidat de la caractérisation des signaux physiologiques à la mise en place des lois de commande adaptées au problème posé. Chaque partie est organisée selon une progressivité dans les difficultés donnant la possibilité à tous les candidats de s'exprimer.

La première partie porte sur l'analyse des propriétés des signaux physiologiques. La connaissance de ces propriétés est en effet indispensable pour construire le cahier des charges et choisir une loi de commande adaptée. Le choix retenu dans le sujet est d'analyser les propriétés spectrales de ces signaux au moyen d'une transformation de Fourier (la connaissance des aspects mathématiques liés à cette transformation complexe n'était pas nécessaire). Pour analyser le spectre du signal, le questionnement amène les candidats à montrer que le calcul d'une transformée de Fourier discrète peut être formulé selon une multiplication matricielle permettant ainsi d'exploiter pleinement les outils de calcul actuels (en évitant l'utilisation de boucles imbriquées). L'analyse des propriétés du signal est exploitée dans la suite de cette partie afin de compléter un cahier des charges définissant d'une façon classique les performances en termes de rapidité et de précision vis-à-vis de signaux constants, mais aussi d'une façon « moins classique » dans le cas de signaux de consigne périodiques et de perturbation variant dans le temps.

La deuxième partie du sujet a comme objectif de construire le modèle dynamique nécessaire au développement des lois de commande. La construction de ce modèle est effectuée en exploitant les équations de la dynamique afin de définir une formulation paramétrique. Pour l'identification des paramètres, le candidat est invité à exploiter l'enregistrement de la vitesse en réponse à un profil d'accélération. Cette deuxième partie a aussi pour objectif de déterminer les résolutions de la chaîne de mesure nécessaires pour satisfaire le cahier des charges en termes de précision.

La troisième partie a comme objectif de déterminer une commande stabilisante en boucle fermée, par le choix des pôles, au moyen d'une loi de commande à deux paramètres. L'analyse de cette loi de commande au regard des couples perturbateurs (un des problèmes importants dans ce type de système en raison du phénomène de frottement sec) amène le candidat à conclure qu'elle ne permet pas de satisfaire les exigences du cahier des charges au regard de la précision exigée. La solution « classique » dans ce type de problème aurait été d'introduire une action intégrale dans la loi de commande, mais cette approche, pour ce type de système, aurait eu comme conséquence de dégrader la robustesse ou de diminuer la performance dynamique. La solution retenue amène d'une façon progressive le candidat à mettre en place un observateur (selon une approche fréquentielle en cohérence avec le programme de CPGE) en vue d'estimer le couple perturbateur. Cette estimation est ensuite exploitée pour mettre en place une compensation. Cette partie s'achève par un questionnement amenant le candidat à montrer que la loi de

commande déterminée au préalable, complétée par l'observateur et la compensation, assure la stabilité du système bouclé tout en vérifiant le cahier des charges en termes de précision.

La quatrième partie de ce sujet propose au candidat d'aborder la compensation des mouvements physiologiques modélisés comme un signal périodique à deux composantes harmoniques seulement, pour satisfaire un des objectifs importants de l'étude proposée. Le questionnement initial permet de conclure que la loi de commande développée dans la partie III n'assure pas le niveau de précision requis vis-à-vis des mouvements physiologiques. L'exploitation du modèle harmonique de ce mouvement amène ensuite le candidat à concevoir une correction par anticipation, en complément de la loi de commande en boucle fermée, qui permette enfin de résoudre le problème de précision sur ce type de mouvement.

Une question de synthèse permet au candidat de conclure sur les performances du système de commande conçu et sur sa pertinence par rapport au problème posé.

Analyse globale des résultats

Les prestations des candidats suscitent cette année, de la part du jury, les mêmes remarques générales que celles des années précédentes. Manifestement les rapports de ces dernières années n'ont pas eu l'impact attendu sur la préparation en CPGE. Malgré ce constat, le jury reprend les remarques antérieures.

D'une façon récurrente :

- les meilleures notes sont attribuées aux candidats qui montrent de réelles capacités à analyser, modéliser, calculer, critiquer et à communiquer par écrit ;
- les réponses données sans aucune justification ne sont pas prises en compte par les correcteurs. Les pages de « verbiage écrit » doivent être remplacées par des explications claires et concises ;
- les résultats numériques sans unité sont lourdement pénalisés. Le jury conseille aux candidats de prendre le temps de vérifier l'homogénéité des résultats, de faire les applications numériques lorsqu'elles sont demandées et d'en faire une analyse critique (ordre de grandeur, nombre de chiffres significatifs).

Et à nouveau cette année :

- le jury regrette de trouver de plus en plus de copies dont la qualité de présentation n'est pas du niveau attendu pour ce concours. De plus en plus de réponses sont illisibles. Les lettres ne sont pas identifiables en étant mal ou pas du tout formées. Les signes dans les formules ne sont pas reconnaissables. Le jury, cette année encore, a fait beaucoup d'efforts pour déchiffrer les copies. Il ne le fera plus. Dans le doute, ces réponses seront sanctionnées par les correcteurs ;
- le jury recommande aux candidats d'indiquer le numéro des questions correspondant aux réponses qu'ils développent et de mettre en relief les résultats ;
- les réponses aux questions confirment la dérive du manque de rigueur dans les raisonnements et dans l'application des théorèmes. Le jury sanctionne bien sûr les fautes dans les formules littérales, mais aussi les manquements ou insuffisances, et les imprécisions ;
- les questions de dynamique sont cette année, plus encore que les précédentes, mal traitées. Les candidats manquent de connaissances et de méthodes. Ils ne respectent pas les notations usuelles (absence du repère de dérivation en cinématique, mouvements relatifs non précisés, etc.) et aboutissent quasi systématiquement à des résultats faux ou non homogènes ;
- le jury souligne le nombre d'erreurs de signe anormalement élevé ;
- le jury conseille enfin aux candidats de s'appropriier le problème posé avant de se lancer dans les calculs de sa résolution.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

I.A – Analyse des propriétés des signaux des mouvements physiologiques

L'objectif de cette partie est de mettre en place une méthode et une procédure de calcul des propriétés spectrales des signaux physiologiques. Le questionnement amène logiquement le candidat à exprimer le spectre du signal sous la forme d'un produit matriciel qui permet ensuite de concevoir une procédure simple en Python permettant le calcul effectif du spectre. Les propriétés obtenues sont exploitées dans la suite du sujet pour compléter le cahier des charges et concevoir la loi de commande. Cette partie, plutôt algorithmique, fait l'objet des questions (Q1–Q6). Une part très importante des candidats a bien compris le problème et a abouti à l'expression formelle du spectre attendue (questions Q1–Q5). Toutefois, le caractère périodique du signal a été souvent omis par les candidats. Un manque de rigueur dans les notations a pénalisé certains candidats comme l'oubli de l'imaginaire pur et/ou du signe négatif de l'exponentielle. Une vérification des dimensions des matrices manipulées et le souvenir que le produit matriciel n'est pas commutatif auraient également évité bien des erreurs.

Cette partie algorithmique et orientée signal est conclue par la question Q6 qui demande au candidat de concrétiser le calcul du spectre. Une part non négligeable des candidats a bien compris l'intérêt de la formulation proposée et de l'exploitation matricielle pour mettre en place la procédure de calcul en Python (très compacte dans la forme proposée). Une partie des candidats a moins bien réussi cette question en utilisant une approche « plus classique » au moyen de boucles.

I.B – Cahier des charges partiel de la chaîne d'asservissement en position du robot esclave

Cette partie, questions Q7–Q9, doit amener les candidats à compléter le cahier des charges donné avec les propriétés des signaux. Elle amène également les candidats, en utilisant une approche « classique » par le choix des pôles en boucle fermée, à déterminer la bande passante (ou plus précisément la pulsation propre) à même de satisfaire le niveau de précision requis. Le questionnement amène le candidat à conclure que cette approche conduit à une contradiction avec le cahier des charges. Cette conclusion justifie le choix de l'architecture de commande étudiée dans les parties III et IV.

Cette partie a été assez bien traitée (Q7–Q8), l'utilisation d'approximations de la fonction de transfert en boucle fermée a amené les candidats aux relations recherchées. Dans leur exploitation, Q9, une part non négligeable de candidats a confondu dans le cahier des charges précision statique (vis-à-vis de signaux d'entrée constants) et dynamique (vis-à-vis des signaux physiologiques).

II.A – Vérification de la capacité du robot esclave

Cette partie, questions Q10–Q13, demande aux candidats de vérifier la capacité du robot esclave à respecter l'exigence de précision et, en conséquence, à dimensionner les capteurs installés. La question Q10 a été assez bien traitée mais beaucoup de candidats donnent encore des valeurs numériques sans unité. À la surprise du jury, l'expression de la relation caractérisant la liaison hélicoïdale (Q11) est très souvent erronée à cause du manque de rigueur dans la démarche et dans les notations ou par méconnaissance de la spécificité du pas à droite (signe négatif) ou encore par la confusion entre le pas réel et le pas réduit. Les candidats, qui n'ont pas répondu correctement à la Q13, méconnaissent la définition de la résolution d'un capteur.

II.B – Détermination et vérification du modèle dynamique du robot esclave

Cette partie, questions Q14–Q24, est consacrée à la caractérisation du modèle dynamique du robot esclave avec deux étapes : l'analyse du fonctionnement du réducteur (Q14–Q16), puis l'élaboration du modèle dynamique d'un axe du robot esclave (Q17–Q24). Les réponses à la Q14 sont souvent bonnes

mais rarement justifiées par un bilan de puissances et celles à la **Q15** sont rarement fausses mais de nombreux candidats n'ont pas proposé de conclusion car ils n'ont manifestement pas perçu la validation demandée.

La forme demandée à la **Q16** n'a pas perturbé les candidats mais beaucoup confondent les inconnues cinématiques avec celles d'actions mécaniques et méconnaissent la représentation des couples sur un graphe de structure. En réponse à **Q17**, presque tous les candidats montrent leur incapacité à proposer une méthode de résolution à partir d'un graphe de structure pourtant très utile. Certaines réponses laissent penser que la notion même de méthode de résolution n'est pas assimilée. Le résultat de la **Q18** dans la base de \mathcal{R}_1 n'a pas été admis et l'absence de la base de dérivation dans la dérivation vectorielle est pénalisée. Cette question, pourtant simple, a généré bizarrement des calculs laborieux. En **Q19**, le calcul de l'aire d'un trapèze isocèle étant très simple, le jury attendait le calcul de l'amplitude de rotation. Beaucoup ne font pas le calcul numérique. Les réponses erronées des **Q20–Q21** suscitent les remarques récurrentes du jury dans le traitement de la dynamique : manque de rigueur, manque de méthode, erreurs de signes, abandon après deux lignes de calcul, pas d'application numérique, peu d'utilisation des propriétés du produit mixte. En **Q22**, peu de candidats développent la démarche utilisée pour déterminer les valeurs numériques. Le jury rappelle que c'est au candidat d'expliquer sa démarche et non au jury d'essayer de la deviner en fonction des résultats donnés. Enfin, l'analyse des écarts demandée en **Q23** est décevante car très peu de candidats proposent des réponses pertinentes. Il s'agit pourtant de l'une des compétences attendues de la formation de S2I.

III Définition et analyse de la chaîne d'asservissement du robot esclave

Cette partie, à la difficulté croissante, est assez bien réussie sur les premières questions **Q24–Q27**. Les erreurs sont des erreurs de calculs ou de mauvaise interprétation de la consigne. Dans la suite, **Q28–Q29**, beaucoup de candidats se perdent dans des développements inutiles alors que des solutions permettent de conclure rapidement. Le jury a pénalisé des conclusions hasardeuses, non argumentées, dans l'analyse de la précision et de la stabilité. Très peu de candidats ont trouvé le bon polynôme caractéristique.

IV Analyse des performances vis-à-vis des mouvements respiratoires

Dans l'ensemble, cette partie a été bien traitée par les candidats qui l'ont abordée avec la rigueur suffisante. Dans **Q30**, le sujet propose un modèle approché du comportement en boucle fermée afin d'analyser la précision vis-à-vis des deux composantes du mouvement physiologique. Beaucoup de candidats ont utilisé, d'une façon mécanique sans se poser la question du bien-fondé de la méthode, le théorème de la valeur finale ; ce qui n'a pas de sens dans le cas d'un signal sinusoïdal. Les **Q31** et **Q33** ont été bien traitées, mais par très peu de candidats. Certains ont considéré, à tort, que les variables notées avec et sans étoile (correspondant respectivement à la consigne et à la sortie) désignaient la même grandeur. Enfin la question de synthèse (**Q34**) a été peu abordée et d'une façon peu structurée avec des réponses parfois confuses et peu argumentées. Les candidats n'appuient pas suffisamment leurs réponses sur les données du sujet : critères concernés du cahier des charges, comparaison des performances obtenues à celles espérées. Beaucoup trop de candidats ne s'appuient pas encore suffisamment sur des données quantitatives relevées sur les résultats fournis et sur les critères précisés dans le cahier des charges.

Conclusion

Les sujets de sciences industrielles pour l'ingénieur sont construits autour d'une problématique industrielle. Découpés en plusieurs parties, ils proposent une progressivité dans la démarche de compréhension du système, d'analyse et de modélisation. Ainsi, les candidats qui papillonnent, en ne traitant pas les problèmes dans l'ordre, éprouvent davantage de difficultés à répondre aux questions. Le jury rappelle

tout le bénéfice que les candidats peuvent tirer de la lecture complète du sujet avant de commencer la rédaction.

La validation de l'étude en S2I est conduite par l'analyse de l'écart entre les performances attendues, données dans le cahier des charges et les performances simulées, calculées au fil des questions. Le jury conseille donc de lire attentivement le cahier des charges pour identifier ces écarts en s'appuyant sur le critère ou le niveau d'exigence demandé. Il attend qu'ensuite le candidat se prononce sur la pertinence de la solution, analyse ces écarts, en identifie les causes et imagine des remèdes. Le jury ne peut se satisfaire de réponses superficielles.

Comme chaque année, le jury se réjouit de trouver d'excellentes copies qui sont manifestement le fruit d'un travail soutenu et de compétences affirmées. Par la qualité de leur prestation, ces candidats valident la longueur et l'adéquation de l'épreuve au public visé. Par leur exemple, ils encouragent les futurs candidats et leurs formateurs à persévérer dans la voie de l'excellence de la préparation.

Ces excellentes copies montrent également que, malgré le contexte particulier d'une épreuve de concours, il est possible de rédiger les réponses avec un graphisme clairement lisible et une présentation soignée. Cette capacité n'est pas partagée par tous. Aussi, le jury invite les professeurs de CPGE à exiger un niveau de qualité dans les copies que les étudiants leur remettent au cours des deux années de préparation.