

Sciences Industrielles de l'Ingénieur

Présentation du sujet

L'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur de la session 2016 porte sur un asservissement en position, par traitement d'images, d'une plateforme soumise à des perturbations, aux jeux et à la souplesse des chaînes de transmissions mécaniques. Développée pour valider des modèles mécaniques de colonnes vertébrales affectées par des troubles musculo-squelettiques cette plateforme Hexapode est positionnée par rapport à un repère absolu par traitement des images prises par des caméras fixes.

Ce support Hexapode est connu des candidats car la maquette Stewart fait partie de l'équipement d'un nombre important de laboratoires de S2I en CPGE. L'originalité du sujet réside dans le questionnement qui amène progressivement le candidat à valider une partie des exigences du cahier des charges exprimé sous la forme d'un diagramme d'exigences SysML, puis à construire un système d'équations permettant d'obtenir la position de la plateforme mobile sous la forme d'un problème d'optimisation par les moindres carrés pour, enfin, mettre en place une architecture de commande permettant de s'affranchir du retard dû à la prise et au traitement des images.

En s'appuyant sur la démarche de résolution d'un problème de sciences industrielles de l'ingénieur, le sujet est organisé en trois parties, équilibrées, avec une progressivité dans les difficultés donnant la possibilité à tous les candidats de s'exprimer :

- étude cinématique pour développer un modèle permettant de quantifier l'erreur de positionnement de la plateforme ;
- analyse de la précision de la plateforme au regard de la rigidité de la chaîne de transmission ;
- asservissement par traitement d'images successives lors du déplacement de la plateforme.

Les grandes thématiques du programme (géométrie, cinématique, théorie et modélisation des mécanismes, quasi-statique, asservissement, traitement de l'information) sont équitablement réparties dans l'étude proposée.

Analyse globale des résultats

Les prestations des candidats suscitent de la part du jury quelques remarques générales, dont la plupart sont similaires à celles des années précédentes, et quelques remarques spécifiques à cette session :

- les meilleures notes sont attribuées aux candidats qui montrent de réelles capacités à analyser, à modéliser, à calculer, à critiquer et à communiquer par écrit ;
- les réponses données sans aucune justification n'ont pas été prises en compte par les correcteurs. Les pages de « verbiage écrit » doivent être remplacées par des explications claires, concises, propres et appuyées sur des schémas pertinents ;
- dans les questions du type « montrer que... », trop de candidats essaient de « noyer » le correcteur pour aboutir au résultat comme par magie. Cette stratégie est évidemment sanctionnée ;

- les questions de mécanique (cinématique, quasi-statique) sont cette année, encore plus que les années précédentes, mal traitées. Les candidats manquent de connaissances et de méthodes. Ils ne respectent pas les notations usuelles (présence du repère de dérivation, mouvement relatif, d'entraînement, etc.) et aboutissent systématiquement à des résultats faux ;
- 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 adapté) ;
- trop de candidats remettent des copies dont la qualité de présentation n'est pas du niveau attendu et digne de ce concours. Certaines réponses sont illisibles. Ces candidats ont été sanctionnés par les correcteurs. De plus, il est recommandé aux candidats d'indiquer le numéro des questions correspondant aux réponses qu'ils développent et de mettre en relief les résultats.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

I Étude cinématique de la plateforme Hexapode

L'objectif de cette partie est de développer un modèle cinématique inverse de la plateforme pour vérifier son positionnement. Le modèle attendu a été conçu en vue de son exploitation dans la partie II pour l'analyse de la précision et la vérification d'une partie des exigences du cahier des charges.

Cette partie, faisant l'objet des questions **Q1** à **Q7**, suscite les commentaires suivants :

- une part très importante de candidats a des difficultés à établir un schéma cinématique plan (**Q1** à **Q3**) et à en valider le fonctionnement par une simple visualisation mentale du mouvement. Le jury a été surpris par le nombre de candidats qui ne connaissent pas la symbolisation normalisée des liaisons. Les méthodes d'obtention de la liaison équivalente ne semblent pas connues car le résultat est donné intuitivement. Il est alors généralement faux ;
- dans les questions **Q3** et **Q4**, les candidats sont invités à déterminer, par une méthode formalisée, le nombre de paramètres indépendants du mouvement pour positionner le centre d'une des rotules supérieures (**Q3**) et d'en déduire le nombre de degrés de liberté de la plateforme (**Q4**). Ce calcul a posé des difficultés à une part très importante des candidats incapables de développer une démarche rigoureuse. Certes, la question **Q3** exigeait un peu d'autonomie car le paramétrage et la méthode n'étaient volontairement pas donnés. Mais lorsque le problème a été bien posé, cette question n'a pas présenté de difficultés majeures aux candidats ;
- les questions **Q5** à **Q7** amènent progressivement le candidat à établir le problème inverse permettant de déterminer la longueur à imposer aux axes motorisés en vue de déduire l'amplitude de mouvement de la plateforme mobile. Bien qu'une partie importante des candidats traite correctement ces questions, le jury note une absence de rigueur dans les manipulations des vecteurs (détermination d'une normale unitaire et d'une longueur) qui conduisent à des erreurs et à des conclusions fausses pour la vérification du débattement de la plateforme.

II Précision en position de la plateforme mobile

Cette partie, questions **Q8** à **Q16**, amène les candidats à conclure à la nécessité d'une loi de commande pour pallier les erreurs de précision induites par une rigidité trop faible des axes.

La partie la plus rigoureuse amène le candidat à exprimer le calcul des efforts sur les axes sous la forme d'un système d'équations linéaires $MF = A_{\text{ext}}$ où M est une matrice à déterminer, A_{ext} un vecteur contenant les actions extérieures et F les efforts sur les axes donnés par la relation $F = M^{-1}A_{\text{ext}}$ (questions **Q9** à **Q11**). Si le théorème de la résultante statique est globalement bien traité par la plupart des candidats, la manipulation du théorème du moment statique est mal maîtrisée. Beaucoup de candidats n'ont pas réussi à expliciter correctement la matrice (pour les différentes composantes il était uniquement demandé d'expliquer les termes de la première colonne). Les candidats étaient ensuite invités (**Q11**) à montrer que cette matrice était inversible et à en déduire qu'il était possible de calculer le vecteur des efforts F . Cette propriété pouvait se démontrer très rapidement et simplement en montrant que le modèle retenu pour l'hexapode est isostatique ($h = 0$). Peu de candidats ont pensé à utiliser cette démarche, et parmi ceux qui l'ont abordée, un nombre important n'a pas réussi à démontrer rigoureusement le résultat attendu.

La suite des questions **Q12** à **Q16** porte sur l'analyse de la précision au regard de la rigidité de l'axe. Une part appréciable des candidats a pu traiter ces questions. Cependant le jury souligne que certains candidats ne font pas d'effort pour simplifier les relations obtenues, ne vérifient pas systématiquement l'homogénéité des résultats ou encore la cohérence des résultats (par exemple $K_{g_{\min}} > K_{g_{\max}}$). Ces étourderies empêchent de conclure correctement sur le niveau de performance attendu et sur le besoin de mettre en place un asservissement.

III Asservissement par traitement d'images

Cette partie doit mener le candidat à la conception d'une structure de commande et à la synthèse des correcteurs associés en vue d'asservir la position de la plateforme à une position de référence. En vue de s'affranchir de la rigidité des axes et des jeux dans les liaisons, la position (par rapport à un repère absolu) de la plateforme est estimée par un système de traitement d'images opérant sur l'image courante (image décalée) et sur l'image de référence (image en position nominale).

Le questionnement de cette partie a été découpé selon deux axes équilibrés :

- le développement d'une procédure permettant de formuler l'algorithme d'estimation de la position sous la forme d'un problème d'optimisation au sens des moindres carrés (**Q17** à **Q21**) ;
- le développement d'une loi de commande permettant de s'affranchir des retards induits par la prise et le temps de traitement des images (**Q22** à **Q27**).

Dans la partie traitement des images, le questionnement amène le candidat à formuler le problème sous la forme d'un système d'équations linéaires dont la résolution permet d'obtenir la position de la plateforme.

Le début de cette partie (**Q18** : réécriture de la fonction de coût à optimiser en utilisant un développement en série de Taylor au premier ordre d'une fonction à plusieurs variables) a été réussi par la majorité de candidats. Le jury note toutefois que certains candidats ne maîtrisent pas le développement en série de Taylor ce qui ne leur permet pas d'aborder correctement les questions concernées. Cependant, même si la plupart des candidats disposent d'une fonction de coût correctement formulée, ils ne réussissent généralement pas à l'exploiter. Pour minimiser une fonction la majorité des candidats annule la fonction ! Quelques candidats seulement pensent à la dériver par rapport aux paramètres et arrivent à exprimer la résolution du problème sous la forme d'un système linéaire (**Q19** et **Q20**).

L'estimation du gradient spatial (**Q21**) semble bien maîtrisée par une part non négligeable des candidats. On peut noter quelquefois des confusions avec des dérivées temporelles et un manque de rigueur dans la définition de la dérivée numérique pour estimer ce gradient.

Les questions **Q22** à **Q27** amènent le candidat à concevoir d'une façon progressive l'architecture d'asservissement adaptée au retard en utilisant, sans le citer explicitement, un prédicteur de Smith. Cependant en raison du caractère intégrateur de la fonction de transfert du procédé, l'utilisation « directe » du prédicteur conduit à un régulateur instable d'un point de vue interne. Pour pallier ce problème une solution à deux boucles, avec un prédicteur de Smith dans la boucle externe, était proposé. Le questionnement amène d'une façon progressive le candidat à montrer les propriétés du prédicteur (**Q24**), à mettre en évidence le problème de stabilité interne (**Q26**) et à valider la solution à deux boucles finalement retenue (**Q27**).

Les réponses des candidats à cette partie suscitent les commentaires suivants :

- le retard pur n'est pas suffisamment bien maîtrisé. Il s'agissait de compléter le tracé d'un diagramme de Bode en prenant en compte le retard pur. Si une part importante des candidats arrive à conclure sur le module, le tracé du diagramme de phase n'est réussi que par un nombre très faible de candidats. Il ne s'agissait que de calculer l'argument d'un nombre complexe $e^{i\tau\omega}$. Parmi les erreurs relevées, le jury constate que certains candidats font un décalage vertical constant (indépendant de la pulsation), font des erreurs dans les unités (degrés/radians) et réalisent des tracés imprécis sans prendre le temps de noter d'une façon précise quelques points pour le tracé du diagramme ;
- une partie des candidats a réussi le calcul du correcteur PI mais une part trop importante éprouve des difficultés pour cette synthèse. Les difficultés sont liées pour l'essentiel à une démarche développée sans une rigueur suffisante. Le candidat devait
 - dans un premier temps déterminer la condition sur l'argument du correcteur à la pulsation de coupure imposée $\arg(C(j\omega_c))$ à partir d'une lecture simple à la pulsation du diagramme de Bode fourni ;
 - par un calcul simple d'argument, déterminer la valeur du paramètre T_i ;
 - conclure par le calcul du gain.

Beaucoup de candidats se lancent dans des développements calculatoires sans utiliser le diagramme de Bode fourni (pas de prise de recul dans la façon d'aborder ce calcul), ne pensent pas à faire le calcul de l'argument à la pulsation ω_c et inversent l'ordre de calcul (gain avant action intégrale). La démarche était donnée dans le sujet.

La question **Q24**, permettant de montrer les propriétés du prédicteur de Smith a été bien réussie et la majorité des candidats montre une bonne maîtrise du passage boucle ouverte/boucle fermée, sur une structure simple. Cependant, démontrer les propriétés de stabilité interne de la première structure (**Q26**) et celles de la deuxième structure (**Q27**) a été une difficulté importante. Et cela, bien que le calcul, fondé sur un passage boucle ouverte/boucle fermée par rapport aux perturbations, soit de même ordre de difficulté que celui de la question **Q24**. Cela provient, peut-être du fait que les candidats font ce calcul d'une façon mécanique sans prendre de recul avant d'aborder la question. À noter que quelques candidats (en nombre très faible) ont répondu à cette question sans calcul en déduisant directement qu'en régime permanent la commande était identique à la perturbation (et de signe opposé). Bien sûr, ces réponses ont été acceptées et le jury aurait apprécié d'en avoir davantage.

La question de synthèse (**Q28**) a été dans l'ensemble assez bien abordée même si les réponses sont parfois confuses ou manquent d'argumentation précise. Les candidats n'appuient pas suffisamment leurs réponses sur les données du sujet : cahier des charges, performances obtenues comparées à

celles espérées, etc. Beaucoup trop de candidats ne s'appuient pas encore suffisamment sur des données quantitatives relevées sur les résultats fournis et sur le cahier des charges donné.

Conclusion

La pertinence de la problématique, la clarté pédagogique de l'étude et son originalité laissaient espérer de belles prestations des candidats. Malheureusement, de façon inattendue, les résultats sont globalement décevants.

Constatant qu'au cours des sessions précédentes des sujets bien plus délicats, bien plus longs, ont été bien mieux traités, le jury s'interroge sur cette dégradation. Il veut croire qu'elle est conjoncturelle c'est à dire, due à une nécessaire adaptation de la formation aux nouveaux programmes de CPGE et non à une diminution des compétences des bacheliers.

Pour les futurs candidats, le jury rappelle que les sujets de sciences industrielles pour l'ingénieur sont construits autour d'une problématique industrielle. Découpés en 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 le problème 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.

Cependant, 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.