

Systèmes mécatroniques asservis

Projet : Modélisation d'un scalpel robotisé

Valentin Gies

1 Présentation

L'évaluation en ES206 a lieu sous forme d'un projet. L'étude est à faire individuellement : un rapport est à rendre à la date indiquée par le professeur, il sera constitué d'une présentation du travail effectué et des résultats sous forme d'un rapport d'environ 6-8 pages. Les questions du sujet sont là pour vous guider dans votre réflexion, il n'est pas nécessaire de faire figurer les réponses dans le rapport dans l'ordre proposé.

Le thème du projet de cette année est la modélisation d'un scalpel monté sur un bras manipulateur robotisé. Le système mécatronique considéré sera utilisé pour effectuer des opérations chirurgicales de haute précision (inférieure à 0.5mm) sur des organes, il permet d'effectuer des opérations télécommandées à distance et peut fournir une aide au chirurgien.



Figure 1: Robot chirurgical Da Vinci

1.1 Paramètres du système

Coefficient de raideur de la peau non déchirée : $k_1 = 200N.m^{-1}$

Coefficient normalisé de raideur de la peau déchirée : $k_2 = 80N.m^{-1}$

Coefficient normalisé de frottement fluide : $h = 30N.m^{-1}.s$

Force maximale avant rupture de la peau : $F_{max} = 1N$

Masse de la portion de chair considérée : $m = 210^{-3}kg$

2 Modélisation de l'interaction {peau-scalpel}

On utilisera un modèle très simplifié de l'interaction peau-scalpel. On considère que l'on isole une portion de chair et on examine les actions s'exerçant sur cette portion de chair.

On note $z_{scalpel}$ la profondeur à laquelle est enfoncé le scalpel par rapport à la surface au repos de l'organe. On note z_{peau} la profondeur de la déformation de la peau de l'organe.

Le modèle choisi a les propriétés suivantes :

- Le bras manipulateur est considéré parfaitement rigide (*i.e.* non élastique).
- On néglige les effets de la pesanteur.
- La peau de l'organe se perce ($z_{scalpel} \neq z_{peau}$) si et seulement si la force F exercée par le scalpel sur la peau devient supérieure à F_{max} .
- Si la peau n'est pas percée : $z_{scalpel} = z_{peau}$ et la force exercée par le scalpel sur la peau est égale à : $F = k_1 z_{scalpel}$. La tension de la peau est opposée et vaut donc : $F_{peau} = -k_1 z_{scalpel}$
- Si la peau est percée, une force de frottement fluide (lame contre chair) est ajoutée et on a
$$\frac{d^2 z_{peau}}{dt^2} = -\frac{k_2}{m} z_{peau} + \frac{h}{m} \frac{d(z_{scalpel} - z_{peau})}{dt}$$

⇒ Proposer sous Simulink une modélisation de la force s'appliquant sur l'élément de peau considéré, en ayant comme entrée z_{peau} et $z_{scalpel}$. On utilisera le composant Switch :

$$\text{Simulink} \rightarrow \text{SignalRouting} \rightarrow \text{Switch}$$

Il permet de sélectionner une entrée parmi 2 en fonction d'une condition.

On utilisera également le composant Relay permettant de s'assurer qu'une fois la peau percée, elle ne peut pas revenir dans son état d'origine même si la force exercée diminue :

$$\text{Simulink} \rightarrow \text{Discontinuities} \rightarrow \text{Relay}$$

Si l'on place ce bloc en sortie du bloc permettant de calculer F dans la cas non percé, on règlera le seuil haut à F_{max} et le seuil bas à (par exemple) $-1000F_{max}$.

⇒ Proposer sous Simulink une modélisation du comportement de la peau soumise à une action du scalpel. Deux cas sont à étudier, le cas où la peau n'est pas percée et le cas où la peau est percée. Pour choisir entre ces deux cas, on pourra utiliser à nouveau le composant Switch avec le même sélecteur que pour la question précédente.

Pour des raisons de discontinuités (dues aux switch), il sera nécessaire de remplacer les blocs de type dérivateur par des blocs ayant par exemple pour fonction de transfert : $\frac{s}{0.0009s^2 + 0.03s + 1}$. Il s'agit d'un bloc de type dérivateur couplé à un filtre passe-bas d'ordre 2 permettant de filtrer les diracs (discontinuités dérivées).

⇒ En prenant en entrée une rampe de pente $10^{-3}m.s^{-1}$ durant 10s, visualiser les graphes de F (force s'exerçant sur la peau), de z_{peau} , de $z_{scalpel}$ et de la profondeur de coupe définie par $P = z_{scalpel} - z_{peau}$. A partir de quelle profondeur $z_{scalpel}$ le scalpel commence-t-il à couper la chair ? Que peut-on dire des constantes de temps mises en jeu ? Est-ce crédible ?

Au cas où vous n'arriveriez pas à construire ce bloc après de longues heures de réflexion, envoyez un courrier électronique au professeur qui vous enverra des éléments de correction.

3 Asservissement en position de système de coupe

On désire à présent faire une incision de longueur 0.5mm dans un organe. On se propose pour cela d'asservir le système en position.

- ⇒ Proposer sous Matlab une solution permettant d'effectuer cette tâche et mettant en jeu un correcteur P (de gain 10) et un retour unitaire. On utilisera en entrée une rampe de position. Augmenter la valeur du gain, que peut-on conclure ?
- ⇒ On se propose à présent d'améliorer la précision du système en utilisant un correcteur PI. Dimensionner le correcteur PI par la méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte et vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble.
- ⇒ Proposer à présent une implantation discrète de ce correcteur. On choisira une fréquence d'échantillonnage élevée ($10kHz$). Vérifier que le comportement est similaire à celui obtenu précédemment.
- ⇒ Le fonctionnement du système est-il conforme au cahier des charges ? Si non, proposez une amélioration.

4 Influence du capteur de profondeur de coupe

Le système est à présent utilisé avec le correcteur P (gain de 10) et retour unitaire. Pour obtenir la profondeur de coupe, on utilise un capteur à ultrasons ayant une fréquence d'échantillonnage de $500Hz$ et un pas de discrétisation de $50\mu m$. Pour modéliser cet effet, on utilise le composant Quantizer :

Simulink → *Discontinuities* → *Quantizer*

- ⇒ Visualiser l'effet de cet échantillonnage (on peut éventuellement modifier les paramètres) sur l'asservissement.
- ⇒ Augmenter progressivement le coefficient du correcteur P, à partir de quelle valeur le système n'est-il plus capable de fonctionner ? Comparer au cas sans échantillonnage.

5 Utilisation en mode télé-opération

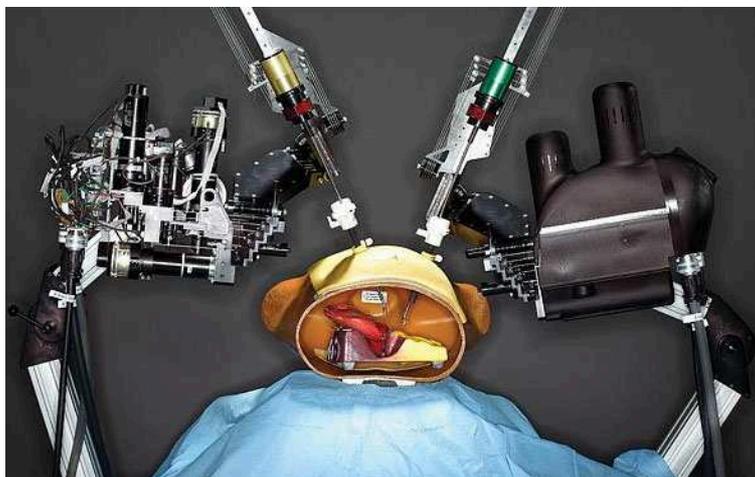


Figure 2: Robot chirurgical Raven

Le système (utilisant le correcteur P avec un gain de 10 et retour unitaire) est à présent piloté à distance (courte ou longue) par un chirurgien souffrant de tremblement dans la main. On modélise ce tremblement par la réalisation d'un processus stochastique qui vient d'ajouter aux mouvements du chirurgien. Pour cela on utilise le composant Uniform Random Generator :

Simulink → *Sources* → *UniformRandomGenerator*

On réglera les paramètres du composant de manière à avoir un tremblement crédible (Oscillation maximale de 1mm (de chaque côté), Sample time : 0.15s).

- ⇒ Planter ce modèle de tremblement et regarder l'effet sur la commande envoyée au scalpel. Observer les conséquences sur la profondeur de coupe.
- ⇒ Proposer une amélioration en mettant en oeuvre un filtrage passe-bas du 1^{er} ordre du mouvement du chirurgien. Quelle constante de temps doit-on choisir ? On plantera le filtre de manière continue et discrète (fréquence d'échantillonnage $10kHz$) sous Simulink : comparer les résultats. Est-ce satisfaisant comme solution ?
- ⇒ Proposer une autre solution ne reposant pas sur un filtrage permettant de diminuer le bruit dû aux mouvements parasites du chirurgien.