



Commande d'un skate-car par biomimétisme

Luc JAULIN

DTN, ENSIETA,

2 rue François Verny, 29806 Brest Cédex 09

<https://www.ensieta.fr/Jaulin/>

jaulinlu@ensieta.fr

Résumé— Le skate-car est un véhicule patineur à cinq patins (à roulettes ou à glace). Ce véhicule imaginaire a pour but de permettre une meilleure compréhension des mécanismes de propulsion du serpent ou de l'anguille. La simplicité des équations d'état du skate-car devrait permettre d'envisager l'élaboration d'une loi de commande non-linéaire efficace. Pourtant, la nature du système rend les techniques de commande classiques inutilisables. Cet article montre qu'une approche par biomimétisme permet de commander relativement facilement ce système.

Mots-clés— anguille, biomimétisme, commande non linéaire, robotique, serpent.

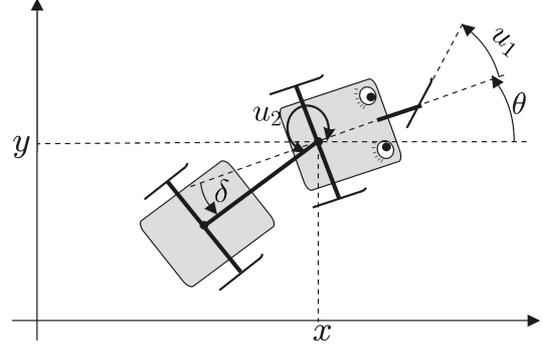
I. INTRODUCTION

Cet article propose un système mécanique simple, mais dont la commande est difficile par les techniques non-linéaires classiques (voir par exemple [9], [3], [8], [7]). Il s'agit d'un véhicule patineur composé de deux chariots articulés. Sa propulsion est faite par un couple moteur au niveau de l'articulation. L'intérêt de ce système est de comprendre les mécanismes de propulsion d'animaux tels que le serpent ou l'anguille [1]. La commande proposée sera faite par biomimétisme dans le sens où l'on cherche à reproduire la propulsion des animaux rampants. Ainsi, on recrée une ondulation qui permettra au robot de se diriger tout en se propulsant. Les techniques existantes ont de grandes difficultés à retrouver uniquement par les équations qu'une ondulation est nécessaire.

Nous allons, tout d'abord, dans le paragraphe II, proposer des équations d'état réalistes pour le skate-car. Le paragraphe III propose un bouclage simple qui cherche à reproduire un mouvement sinusoïdal. Le paragraphe IV propose une méthode à propulsion maximale qui prend en compte les caractéristiques en couple et en puissance du moteur. Une conclusion est donnée au paragraphe V.

II. MODÉLISATION

On considère le véhicule patineur représenté sur la figure suivante



Ce véhicule, que nous appellerons *skate car* est purement imaginaire. Il est conçu pour se déplacer sur un lac gelé et repose sur 5 patins à glace. Ce système a deux entrées : u_1 l'angle du patin avant et u_2 le couple exercé au niveau de l'articulation entre les deux traîneaux et qui correspond à l'angle δ . La propulsion provient donc uniquement du couple u_2 et rappelle le mode de propulsion du serpent ou de l'anguille [4] [2]. Toute commande sur u_1 n'apporte donc aucune énergie au système. La vitesse angulaire du traîneau avant est donnée par

$$\dot{\theta} = \frac{v_1 \sin u_1}{L_1},$$

où v_1 est la vitesse du patin avant et L_1 est la distance entre le patin avant et le milieu de l'essieu du traîneau avant. Si v correspond à la vitesse du milieu de l'essieu du traîneau avant, nous avons

$$v = v_1 \cos u_1.$$

Ces deux relations nous donnent

$$\dot{\theta} = \frac{v \tan u_1}{L_1} \quad (1)$$

Vu du traîneau arrière, tout se passe comme si au milieu de l'essieu du traîneau avant, il y avait une roue virtuelle se déplaçant avec ce dernier. Ainsi, la vitesse angulaire du traîneau arrière est

$$\dot{\theta} + \dot{\delta} = -\frac{v \sin \delta}{L_2}$$

où L_2 est la distance entre les milieux des essieux. Et donc

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= -\frac{v \sin \delta}{L_2} - \dot{\theta} \\ &\stackrel{(1)}{=} -\frac{v \sin \delta}{L_2} - \frac{v \tan u_1}{L_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

D'après le théorème de l'énergie cinétique, la dérivée temporelle de l'énergie cinétique est égale à la somme des puissances apportées au système, c'est-à-dire,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = \underbrace{u_2 \cdot \dot{\delta}}_{\text{puissance motrice}} - \underbrace{(\alpha v) \cdot v}_{\text{puissance dissipée}},$$

où α est le coefficient de frottement visqueux. Dans un souci de simplification, nous venons ici de supposer la force de frottement est αv , ce qui revient à supposer que seul le traîneau avant freine. Nous avons donc

$$\begin{aligned} m v \dot{v} &= u_2 \cdot \dot{\delta} - \alpha v^2 \\ &\stackrel{(2)}{=} u_2 \cdot \left(-\frac{v \sin \delta}{L_2} - \frac{v \tan u_1}{L_1} \right) - \alpha v^2 \end{aligned}$$

ou encore

$$m \dot{v} = u_2 \cdot \left(-\frac{\sin \delta}{L_2} - \frac{\tan u_1}{L_1} \right) - \alpha v. \quad (3)$$

Le système peut se décrire par les équations d'état suivantes

$$\begin{cases} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &\stackrel{(1)}{=} v \tan u_1 \\ \dot{v} &\stackrel{(3)}{=} -(\tan u_1 + \sin \delta) u_2 - v \\ \dot{\delta} &\stackrel{(2)}{=} -v(\tan u_1 + \sin \delta) \end{cases}$$

où, pour simplifier, les coefficients (masse m , coefficient de frottement visqueux α , distances inter-essieux L_1, L_2, \dots) ont été choisis unitaires. Ce système pourrait être rendu affine en la commande en rajoutant un intégrateur devant u_1 , mais l'approche linéarisation par bouclage [5] ne s'applique pas du fait de nombreuses singularités. En effet, on peut aisément montrer, que lorsque la vitesse v est nulle (facile à éviter) ou lorsque $\dot{\delta} = 0$ (ce qui arrive forcément régulièrement), on a une singularité. Une commande utilisant le *biomimétisme*, copiant la propulsion du serpent ou de l'anguille, peut être envisagée.

III. COMMANDE SINUSOÏDALE

Afin de créer une ondulation nécessaire à la propulsion [4], il semble assez intuitif de prendre u_1 de la forme

$$u_1 = p_1 \cos(p_2 t) + p_3,$$

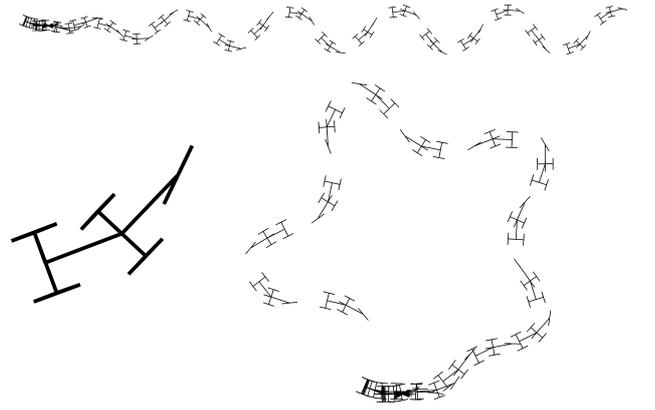
où p_1 est l'amplitude, p_2 la pulsation et p_3 le biais. On choisit u_2 pour que le couple propulseur soit moteur, c'est-à-dire $\dot{\delta} u_2 \geq 0$. En effet $\dot{\delta} u_2$ correspond à la puissance apportée au robot qui se transforme en énergie cinétique. Si u_2 est bornée par l'intervalle $[-p_4, p_4]$, on choisit donc une commande de type bang-bang pour u_2 de la forme

$$u_2 = p_4 \text{sign}(\dot{\delta}),$$

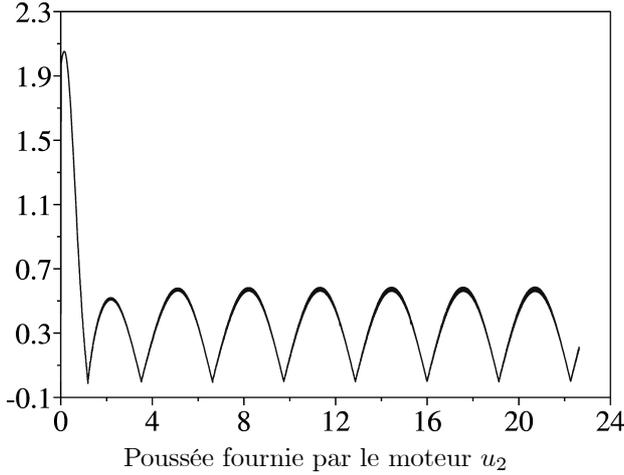
ce qui revient à exercer une propulsion maximale. La commande par retour d'état choisie est donc

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} p_1 \cos(p_2 t) + p_3 \\ p_4 \text{sign}(-v(\tan u_1 + \sin \delta)) \end{pmatrix}.$$

Les paramètres de la commande restent à déterminer. Le paramètre de biais p_3 permet de se diriger. La puissance du moteur couple nous donne p_4 . Le paramètre p_1 doit être inférieur à 0.5 rad de façon à ne pas s'approcher de la phase critique où $\tan u_1 = 0$. Quant au choix du paramètre p_2 l'intuition ne nous aide pas beaucoup et seules les simulations peuvent nous aider à le fixer. La figure ci-dessous illustre deux simulations où le robot part avec une vitesse quasi nulle. Dans la simulation du haut, le biais p_3 est nul. Dans celle du bas, $p_3 > 0$.



La figure ci-dessous représente la poussée en fonction du temps. Il est clair que la puissance fournie par le moteur est très forte au démarrage alors qu'en régime de croisière, le moteur est sous utilisé. Une telle commande oblige à surdimensionner notre moteur. Nous aurions intérêt à avoir une poussée aussi constante que possible.



IV. COMMANDE À POUSSÉE MAXIMALE

La propulsion du robot se fait par la poussée u_2 . $\dot{\delta} = -v(\tan u_1 + \sin \delta) \cdot u_2$ et donc par le moteur qui génère le couple u_2 . Afin d'aller le plus vite possible, pour un moteur donné, il convient de générer un couple maximal choisi \bar{u}_2 (suivant la vitesse désirée) avec une puissance \bar{p} maximale qui dépend des caractéristiques du moteur. Ainsi

$$\underbrace{-v(\tan u_1 + \sin \delta)}_{\dot{\delta}} \cdot \underbrace{\varepsilon \bar{u}_2}_{u_2} = \bar{p}, \text{ avec } \varepsilon = \pm 1.$$

Nous obtenons donc en isolant l'angle u_1 du patin avant

$$u_1 = -\arctan\left(\varepsilon^{-1} \cdot \frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2} + \sin \delta\right).$$

La commande à poussée maximale est donc donnée par

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} -\arctan\left(\varepsilon^{-1} \cdot \frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2} + \sin \delta\right) \\ \varepsilon \bar{u}_2 \end{pmatrix}.$$

Or afin d'avoir une puissance motrice $\varepsilon \bar{u}_2 \dot{\delta}$ positive, il nous faut,

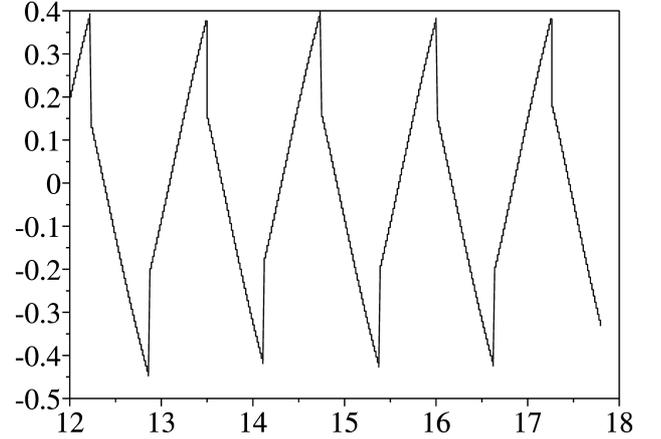
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon^{-1} \\ &= \text{sign}(\dot{\delta}) \\ &= \text{sign}(-v(\tan u_1 + \sin \delta)). \end{aligned}$$

D'où

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} -\arctan\left(\text{sign}(-v(\tan u_1 + \sin \delta)) \cdot \frac{\bar{p}}{v\bar{u}_2} + \sin \delta\right) \\ \text{sign}(-v(\tan u_1 + \sin \delta)) \cdot \bar{u}_2 \end{pmatrix}.$$

Ainsi, avec cette commande, non seulement on pousse toujours dans la bonne direction à travers u_2 mais on joue avec la direction u_1 pour que le couple fourni par u_2 se traduise en une poussée maximale. Il ne nous reste plus qu'à agir sur ε (qui rappelons-le, est un signal créneau qui vaut ± 1)

et sur l'amplitude \bar{u}_2 . Le rapport cyclique du signal nous permettra de nous diriger et sa fréquence nous donnera l'amplitude des oscillations pour la trajectoire du robot. Quant à \bar{u}_2 il nous permet de régler la vitesse moyenne du robot. Sur simulation, cette commande se montre en effet plus efficace que la commande sinusoïdale. La figure ci-dessous nous montre l'angle du patin avant u_1 en fonction du temps, une fois le régime de croisière atteint.



Evolution de l'angle de la roue en régime de croisière

La poussée de même que le couple moteur u_2 sont constants. En revanche, l'angle du patin avant u_1 fait apparaître des discontinuités.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un nouveau véhicule capable de reproduire un comportement proche de celui du serpent ou de l'anguille. Un modèle d'état a été ensuite obtenu en utilisant les équations de la dynamique. Enfin, deux types de commande biomimétique ont été proposés. Ces commandes ont été validées par des simulations. En conclusion, nous pouvons dire que pour des systèmes fortement que nous connaissons bien, soit parce que nous pouvons les observer (système biologique) ou bien parce que nous avons l'habitude de les piloter (bateau à voile [6]), il peut être intéressant de comprendre la méthode de régulation observée afin la reproduire dans le régulateur à concevoir. Un modèle d'état peut alors être utilisé pour améliorer les performances du régulateur.

RÉFÉRENCES

- [1] F. Boyer, M. Alamir, D. Chablat, W. Khalil, A. Leroyer, and P. Lemoine. Robot anguille sous-marin en 3d. In *Techniques de l'Ingénieur*, 2006.
- [2] M. El-Rafei. *Commande d'un robot Anguille*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2008.
- [3] M. Fliess, J. L'evine, P. Martin, and P. Rouchon. Flatness and defect of non-linear systems : introductory theory and applications. *International Journal of Control*, (61) :1327–1361, 1995.

- [4] G. Gallot. *Modélisation dynamique et commande d'un robot anguille*. PhD thesis, Université de Nantes, 2007.
- [5] A. Isidory. *Nonlinear Control Systems : An Introduction, 3rd Ed.* Springer-Verlag, New-York, 1995.
- [6] L. Jaulin. Modélisation et commande d'un bateau à voile. In *CIFA2004 (Conférence Internationale Francophone d'Automatique)*, In *CDROM*, Douz (Tunisie), 2004.
- [7] L. Jaulin. *Représentation d'état pour la modélisation et la commande des systèmes (Coll. Automatique de base)*. Hermès, London, 2005.
- [8] B. Laroche, Ph. Martin, and N. Petit. *Commande par platitude, Equations différentielles ordinaires et aux dérivées partielles*. Disponible sur <http://cas.ensmp.fr/~petit/ensta/main.pdf>, 2003.
- [9] R. Marino and P. Tomei. *Nonlinear Control Design : Geometric, Adaptive and Robust*. Prentice Hall, 1995.