

Approche décentralisée pour la commande adaptative à structure variable: Application à un Quadrotor

F. Khenfri¹ et F. Boudjema²

¹Laboratoire Contrôle et Commande, E.M.P. Bordj El-Bahri

²Laboratoire de Commande des Processus, E.N.P. El-Harrach
Khenfri_fd@yahoo.fr, fboudjema@yahoo.fr

Résumé—Une approche décentralisée pour une commande adaptative à structure variable est proposée pour une classe de système non linéaire interconnecté en utilisant la technique du mode glissant. La commande est synthétisée pour chaque sous-système en tenant compte des informations disponibles localement. Cependant, la synthèse de loi de commande ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle et n'utilise que l'information locale au niveau de chaque sous-système. Une analyse de stabilité est faite par la méthode directe de Lyapunov. Les performances et la robustesse de cette commande appliquées sur un hélicoptère de type quadrotor sont examinées en simulation.

Mots clés— Commande décentralisée, Structure variable, Commande adaptative, Quadrotor.

I. INTRODUCTION

La complexité de l'analyse de stabilité d'un système dynamique non linéaire croît rapidement lorsque l'ordre du système augmente. Cette situation nous incite à chercher des moyens pour simplifier l'analyse. Si le système peut être modélisé comme une interconnexion de sous-systèmes d'ordre inférieur, alors nous pouvons analyser la stabilité en deux étapes. Dans la première étape, nous décomposons le système en petits sous-systèmes isolés en ignorant les interconnexions, puis analyser la stabilité de chaque sous-système. Dans la deuxième étape, nous combinons nos conclusions de la première étape avec l'information sur les interconnexions afin de tirer des conclusions quant à la stabilité du système interconnecté. La commande qui base sur cette étude, il s'appelle commande décentralisée [1][2].

La commande décentralisée présente un certain nombre d'avantages [3][4], à savoir : la minimisation du nombre d'information traitées par les unités de commande, la simplicité des lois de commande élaborées par rapport au cas centralisé ainsi que l'amélioration de la fiabilité de transfert de données en n'utilisant que l'information locale. L'intérêt majeur de la décentralisation est la simplification de la synthèse et de l'implémentation des régulateurs. Chaque sous-système est commandé par une station de commande locale. Cette dernière n'utilise pas les informations des autres sous-systèmes [5].

Dans un contexte non adaptatif, la mauvaise identifiabilité des systèmes couplés, causée principalement par leur complexité, explique, en partie, le manque de résultats constaté. C'est pourquoi, l'approche adaptative présente, pour ces systèmes, une solution particulièrement attrayante. Avec une telle méthode, les interactions, mal connues, sont automatiquement prises en compte [6].

La commande à structure variable (CSV) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de

définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase [7].

Dans cet article, nous combinerons la commande décentralisée, la technique du mode glissant et l'approche adaptative pour profiter l'avantage de chacune des notions, pour commander une classe de système non linéaire interconnecté. Pour cela, nous commencerons à présenter la classe du système non linéaire étudié dans ce travail dans la section II. Nous aborderons ensuite la synthèse de la loi de commande dans la section III. La section IV sera consacrée à la présentation des résultats de simulation de la commande proposée appliquée au Quadrotor.

II. CLASSE DE SYSTEMES INTERCONNECTES

Dans cet article, notre objectif principal est la synthèse d'une loi de commande adaptative décentralisée stabilisantes et robustes pour un système de n degré de liberté (ddl) décrit sur la forme suivante :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u + u_p(1)$$

Avec :

$q \in \mathbb{R}^n$: Vecteur des positions ;

$\dot{q} \in \mathbb{R}^n$: Vecteur des vitesses ;

$\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$: Vecteur des accélérations ;

$u \in \mathbb{R}^n$: Vecteur de commandes (forces ou couples) ;

$u_p \in \mathbb{R}^n$: Vecteur de perturbation externe ;

$M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: Matrice bornée définie positive ;

$C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: Matrice de forces et/ou couples dus aux accélérations de Coriolis, gyroscopique et/ou centrifuge ;

$G(q) \in \mathbb{R}^n$: Vecteur de forces et/ou couples dus aux forces de gravitation.

Le modèle dynamique (1) contient de fortes interconnexions entre les sous-systèmes. Les matrices M , C et G sont des fonctions non-linéaires compliquées qui dépendent des coordonnées généralisées et ses vitesses.

III. SYNTHÈSE DE LA COMMANDE

Pour synthétiser la commande adaptative décentralisée pour le modèle dynamique (1), nous considérons chaque degré de liberté comme un sous-système non linéaire

interconnecté. Alors, le modèle dynamique pour chaque sous-système est donné par :

$$m_{ii}(q)\ddot{q}_i + \kappa_{ii}(q, \dot{q})\dot{q}_i + d_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = u_i ; i = 1, \dots, n \quad (2)$$

avec

$$d_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = g_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n m_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1, j \neq i}^n \kappa_{ij} \dot{q}_j + u_{pi} \quad (3)$$

L'équation (2) présente un modèle dynamique d'entrée-sortie pour chaque sous système $i^{ième}$ avec des termes d'interconnexions variables et bornées $m_{ii}(q)$, $\kappa_{ii}(q, \dot{q})$ et $d_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$. La commande $u_i(t)$ et la perturbation u_{pi} sont des entrées et $q_i(t)$ est la sortie $i^{ième}$ de chaque sous-système. Le terme $d_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ peut être considéré comme une perturbation (force ou couple).

Afin de développer notre contrôleur, les hypothèses suivantes sont nécessaires par la suite.

Hypothèse III.1 : Le terme $m_{ii}(q)$ est non nul et de signe positif et sa dérivée temporelle est bornée par une constante positive inconnue D_i , i.e. $|\dot{m}_{ii}(q)| \leq D_i$

Hypothèse III.2 : Chaque trajectoire de référence q_{di} , \dot{q}_{di} et \ddot{q}_{di} sont supposées continues, bornées et connues.

Hypothèse III.3 : Les interconnexions satisfont[8]

$$|d_i(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq \delta_{i0} + \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \|e_j\|$$

avec $\delta_{i0}, \dots, \delta_{in}$ sont des constantes positives inconnues, et $\|\cdot\|$ représente la norme euclidienne. $e_j = [e_j \ \dot{e}_j]^T$, $j = 1 \dots n$ est vecteur de l'erreur de chaque sous-système, où $e_j = q_{di} - q_i$ est l'erreur de chaque sous système entre sa désiré et sa sortie mesuré q_i et $\dot{e}_j = \dot{q}_{di} - \dot{q}_i$ est la dérivée temporelle de e_j .

A. Conception de la Commande par mode glissant

L'objectif est la synthèse d'une loi de commande adaptative utilisant la technique du mode glissant pour chaque sous-systèmes et, ceci, en utilisant uniquement les informations locales (variables locales) à chaque sous système, de telle sorte que chaque sortie q_i suit, le plus proche possible, une trajectoire de référence donnée q_{di} tout en garantissant la bornitude de tous les signaux du système entier.

Elle donne par deux étapes

- Choisir une surface de commutation pour forcer la dynamique du sous-système à suivre, au mieux, une dynamique désirée.
- Déterminer la loi de commande décentralisée qui garantit l'accessibilité à la surface de glissement et l'aspect du mode glissant.

Pour chaque sous-système, on peut définir la surface de glissement non linéaire sans tenir compte de l'action intégrale[9]:

$$s_i = \dot{e}_i + \Lambda_i(e_i) \quad (4)$$

avec $e_i = q_{di} - q_i$ est l'erreur de poursuite et $\Lambda_i(\cdot)$ est une fonction Lipchitzienne.

En dérivant l'équation (4), on obtient :

$$\dot{s}_i = \ddot{e}_i + \Lambda'_i(e_i)\dot{e}_i \quad (5)$$

avec $\Lambda'_i(x) = \frac{d\Lambda_i(x)}{dx}$

En utilisant (IV.2), l'équation (IV.5) devient

$$m_{ii}\dot{s}_i = m_{ii}v_i + \kappa_{ii}\dot{q}_i + d_i - u_i \quad (6)$$

avec $v_i = \ddot{q}_{di} + \dot{\Lambda}_i(e_i)\dot{e}_i$

Si on suppose que les sous-systèmes sont isolés l'un de l'autre, i.e. $d_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0$, et que les fonctions non linéaires $m_{ii}(q)$, $\dot{m}_{ii}(q)$ et $\kappa_{ii}(q, \dot{q})$ sont parfaitement connues, la poursuite d'une trajectoire de référence q_{di} peut être assurée par une loi de commande de la forme suivante:

$$u_{eqi} = m_{ii}v_i + \kappa_{ii}\dot{q}_i \quad (7)$$

Néanmoins, la loi de commande (7) présente quelques inconvénients :

- elle ne peut pas être implémentée dans le cas où le système est partiellement ou totalement inconnu,
- elle ne peut pas garantir les performances de poursuite en présence de perturbations externes ou de fortes variations paramétriques.

B. Approche Décentralisée pour la Commande Adaptative à Structure Variable (ADCASV)

Dans cette section, une approche décentralisée pour une commande adaptative à structure variable proposée :

Proposition :

La loi de commande suivante garantit la stabilité du système en boucle fermée et la convergence de l'erreur de poursuite vers zéro, à l'existence des interconnexions entre les sous-systèmes.

$$u_i = \hat{m}_{ii}v_i + \hat{\kappa}_{ii}\dot{q}_i + \hat{m}_{ii}k_i s_i + u_{ai} \quad (8)$$

avec k_i est une constante positive et u_{ai} est un terme de commande robuste, introduit pour compenser les effets de perturbation et les effets des interconnexions donné par :

$$u_{ai} = \hat{m}_{ii}\rho_i \text{sign}(s_i) + \alpha_i s_i \quad (9)$$

avec ρ_i et α_i sont des paramètres estimés en ligne par les lois d'adaptation.

Pour assurer les objectifs de commande, les lois d'adaptation suivantes sont adoptées

$$\dot{\hat{m}}_{ii} = \mu_{m_{ii}}(v_i + k_i s_i) s_i \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\kappa}}_{ii} = \mu_{\kappa_{ii}} \dot{q}_i s_i \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_i = \mu_{\rho_i} \hat{m}_{ii} |s_i| \quad (12)$$

$$\dot{\alpha}_i = \mu_{\alpha_i} s_i^2 \quad (13)$$

avec $\mu_{m_{ii}}$, $\mu_{\kappa_{ii}}$, μ_{ρ_i} et μ_{α_i} sont des constantes positives spécifiées par l'utilisateur.

Démonstration:

En prenant en compte la loi de commande (8), l'équation (6) peut être réécrite sous la forme :

$$m_{ii}\dot{s}_i = \tilde{m}_{ii}v_i + \tilde{k}_{ii}\dot{q}_i + d_i - \hat{m}_{ii}k_i s_i - u_{ai} \quad (14)$$

$$m_{ii}\dot{s}_i = \tilde{m}_{ii}(v_i + k_i s_i) + \tilde{k}_{ii}\dot{q}_i + d_i - m_{ii}k_i s_i - u_{ai} \quad (15)$$

où $\tilde{m}_{ii} = m_{ii} - \hat{m}_{ii}$ et $\tilde{k}_{ii} = k_{ii} - \hat{k}_{ii}$.

Pour étudier la stabilité du système en boucle fermée et pour trouver les lois d'adaptation, nous considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (16)$$

où V_i est une fonction locale de Lyapunov.

$$V_i = \frac{m_{ii}}{2} s_i^2 + \frac{1}{2\mu_{m_{ii}}} \tilde{m}_{ii}^2 + \frac{1}{2\mu_{k_{ii}}} \tilde{k}_{ii}^2 + \frac{1}{2\mu_{\rho_i}} \tilde{\rho}_i^2 + \frac{1}{2\mu_{\alpha_i}} \tilde{\alpha}_i^2 \quad (17)$$

où $\tilde{\rho}_i = \rho_i^* - \hat{\rho}_i$ et $\tilde{\alpha}_i = \alpha_i^* - \hat{\alpha}_i$

avec ρ_i^* et α_i^* sont des paramètres optimaux de ρ_i et α_i .

D'après l'hypothèse III.3, les lois d'adaptation (10) jusqu'à (13), et le terme de commande robuste (9), l'équation de Lyapunov (17) peut être simplifiée à

$$\dot{V}_i \leq -m_{ii}k_i s_i^2 + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_{ij}^2}{4\beta_j} \|e_j\|^2 \quad (18)$$

Nous proposons $|s_i| \leq \phi_i \|e_j\|$, l'équation (16) devient :

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n \left\{ \underline{m}_{ii} k_i \phi_i^2 - \frac{1}{4\bar{\alpha}_i} (\sum_{j=1}^n \delta_{ij}^2) \right\} \|e_j\|^2 \quad (19)$$

avec \underline{m}_{ii} c'est la valeur minimale de m_{ii}

Le choix des paramètres β_i tels que

$$\beta_i = \frac{1}{4(\underline{m}_{ii} k_i \phi_i^2 - \phi_{0i})} (\sum_{j=1}^n \delta_{ij}^2) \quad (20)$$

Permet d'avoir

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n \phi_{0i} \|e_j\|^2 \quad (21)$$

où ϕ_{0i} est une constante positive

En utilisant le lemme de Barbalat[10], on peut constater que tous les signaux du système bouclé : les erreurs de poursuite e_j , les états q_i , les paramètres estimés \hat{m}_{ii} , \hat{k}_{ii} , ρ_i , et α_i les signaux de commande u_i , et la fonction candidate V sont tous bornés. Par conséquent, on déduit la convergence vers zéro des erreurs de poursuite de tous les sous-systèmes.

IV. APPLICATION A UN QUADROTOR

Nous avons procédé à la vérification et le test de la commande proposée au Quadrotor (figure 1). Ce dernier possède, comme son nom l'indique, quatre rotors fixés aux extrémités d'un corps rigide en forme de croix. Chaque rotor est constitué d'une pale à pas fixe accouplée à un moteur à courant continu ou brushless à travers un réducteur. Le mouvement vertical de montée et de descente est assuré par les quatre (04) rotors à la fois. La différence de portance entre les deux rotors avant et arrière produit un couple de tangage qui contrôle le mouvement de translation (avant / arrière). Le déplacement (gauche / droite), quant à lui, est

assuré par la différence de portance entre les rotors situés sur la gauche et sur la droite. Enfin pour contrôler le lacet du système, c'est la somme des anti-couples produites par les quatre rotors qui définit le sens de rotation.

A. Modèle dynamique

Pour étudier le mouvement du quadrotor on utilise deux repères (Fig.1) : le repère $E(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ lié à la terre et le repère $B(O_b, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ lié au corps du quadrotor.

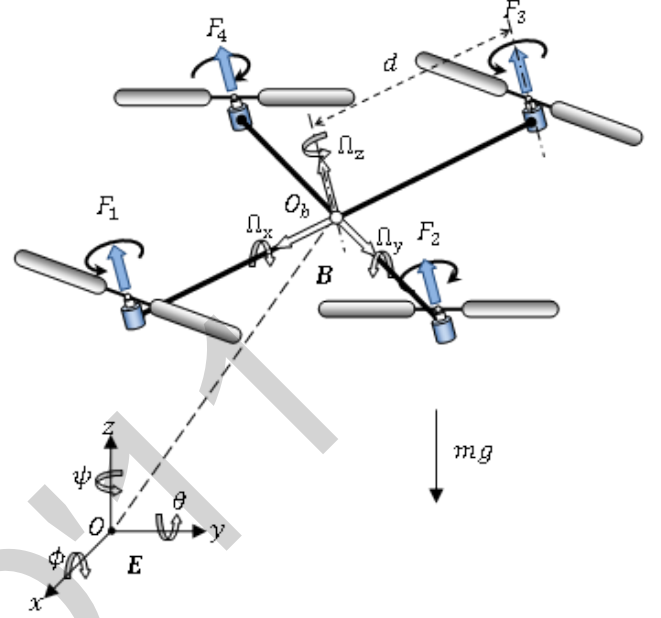


Fig. 1. Quadrotor et ses coordonnées spatiales.

Les équations décrivant l'attitude et la position d'un quadrotor sont fondamentalement obtenues en représentant ce système comme un corps rigide évoluant dans un espace 3D avec six degrés de liberté (ddl), auquel s'ajoutent une force et trois moments[11].

Le vecteur $\xi = [x, y, z]^T$ présente la position du centre de masse du quadrotor lié au repère E, et $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$ le vecteur d'angle d'Euler présente l'orientation du quadrotor. Ces trois angles s'appellent respectivement

- roulis $(-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2})$,
- tangage $(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2})$,
- lacet $(-\pi < \psi < \pi)$.

Soit $V = [u, v, w]^T \in B$ la vitesse linéaire et $\Omega = [p, q, r]^T \in B$ la vitesse angulaire, ces deux vitesses sont liées au repère de corps du quadrotor.

La dynamique du quadrotor peut être obtenue à l'aide du formalisme de Newton. Nous utilisons ici le modèle donnée en référence[12]. Son écriture sous forme matricielle est la suivante :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u + u_p \quad (18)$$

Avec $q = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)^T \in \mathcal{R}^6$ les coordonnées généralisées du quadrotor et $u = (u_x, u_y, u_z, u_\phi, u_\theta, u_\psi)^T \in \mathcal{R}^6$ c'est le vecteur de commande.

Tableau II. 1 Commandes du Quadrotor

$u_x = (C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi) \frac{u_z}{m}$	Commande de position x
$u_y = (C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi) \frac{u_z}{m}$	Commande de position y
$u_z = \sum_{i=1}^4 F_i$	Commande d'altitude z
$u_\phi = (F_2 - F_4)$	Commande de roulis ϕ
$u_\theta = (F_3 - F_1)$	Commande de tangage θ
$u_\psi = (-F_1 + F_2 - F_3 + F_4)$	Commande de lacet ψ
$u_p \in \mathfrak{R}^6$	Vecteur de perturbation externe

avec $S(\cdot)$ et $C(\cdot)$ sont les abréviations respectives de $\sin(\cdot)$ et $\cos(\cdot)$.

La matrice d'inertie $M(q)$ est donnée par

$$M(q) = \begin{pmatrix} \text{diag} \left[1, 1, \frac{m}{C_\theta C_\phi} \right] & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & DM^{rot} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Où m est la masse du quadrotor, la fonction $\text{diag}(\cdot)$ est une matrice diagonale d'un vecteur, $0_{3 \times 3} \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ est la matrice nulle, $D = \text{diag}(d^{-1}, d^{-1}, c^{-1})$ est la matrice constante, d est la distance entre le centre du robot et le rotor, c est le coefficient du transfert force/couple et M^{rot} est la matrice l'inertie de rotation tel que

$$M^{rot} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & -I_x S_\theta \\ 0 & I_y C_\phi & I_y C_\theta S_\phi \\ 0 & -I_z S_\phi & I_z C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (20)$$

Où $\{I_x, I_y, I_z\}$ sont les moments d'inertie du robot par rapport aux axes du repère B.

La matrice $C(q, \dot{q})$ caractérise les effets de Coriolis, telle que

$$C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & DC^{rot} \end{pmatrix} \quad (21)$$

où

$$\begin{aligned} C_{11}^{rot} &= 0 \\ C_{12}^{rot} &= +(I_y - I_z) C_\phi S_\theta \dot{\theta} - (I_x + (I_y - I_z) C_\phi^2) C_\theta \dot{\psi} \\ C_{13}^{rot} &= -(I_y - I_z) C_\theta^2 C_\phi S_\phi \dot{\psi} \\ C_{21}^{rot} &= -(I_x + I_y - I_z) C_\theta C_\phi \dot{\psi} \\ C_{22}^{rot} &= +(I_x + I_y - I_z) S_\phi \dot{\phi} + (I_x - I_y - I_z) S_\theta S_\phi \dot{\psi} \\ C_{23}^{rot} &= -(I_x - I_z) C_\theta C_\phi S_\theta \dot{\psi} \\ C_{31}^{rot} &= -(I_x - I_y + I_z) C_\theta S_\phi \dot{\psi} \\ C_{33}^{rot} &= +(I_x - I_y + I_z) C_\phi \dot{\phi} + (I_x - I_y - I_z) S_\theta C_\phi \dot{\psi} \\ C_{23}^{rot} &= -(I_x - I_z) C_\theta S_\theta S_\phi \dot{\psi} \end{aligned}$$

Le vecteur $G(q)$ représente les forces et couples extérieurs :

$$G(q) = \left(A_x \quad A_y \quad \frac{mg}{C_\theta C_\phi} + A_z \quad A_\theta \quad A_\phi \quad A_\psi \right)^T \quad (22)$$

où $\{A_x, A_y, A_z, A_\theta, A_\phi, A_\psi\}$ sont respectivement les forces et les moments aérodynamiques extérieurs.

B. Résultats de simulation

Les paramètres du quadrotor utilisée pour la simulation sont : $m = 500 \text{ g}$, $d = 0.2 \text{ m}$, $k_b = 4.1510^{-5} \text{ N/rad/sec}$, $c = 0.06 \text{ m}$, $I_x = I_y = 5.610^{-3} \text{ kg m}^2$, $I_z = 10^{-2} \text{ kg m}^2$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, les conditions initiales des gains d'adaptation \hat{m}_{ii} , \hat{k}_{ii} , ρ_i et α_i sont fixés à zéro.

Nous avons opté pour le choix des vitesses d'adaptation suivant:

$\mu_{m_{ii}} = \mu_{k_{ii}} = \mu_{\rho_i} = 0.01$ et $\mu_{\alpha_i} = 0.8$ pour contrôleur z ;
 $\mu_{m_{ii}} = \mu_{k_{ii}} = \mu_{\rho_i} = 0.001$ et $\mu_{\alpha_i} = 0.08$ pour contrôleurs ψ , ϕ et θ ;

$\mu_{m_{ii}} = \mu_{k_{ii}} = 0.0001$, $\mu_{\rho_i} = 0.0008$ et $\mu_{\alpha_i} = 0.08$ pour contrôleurs x et y

Pour montrer l'efficacité et la performance de la méthode proposée, on choisit la fonction non-linéaire de la surface de commutation pour chaque sous-système:

$$A_i(\tilde{q}_i) = \alpha_i \tilde{q}_i + \lambda_i \tanh(\mu_i \tilde{q}_i) \quad (23)$$

Les paramètres de synthèse donnés par le tableau ci-dessous.

Tableau 1 Paramètres de design

	μ_i	λ_i	α_i	k_i
Contrôleur x	2.589	1.491	0.001	10
Contrôleur y	0.196	10	0.001	0.025
Contrôleur z	6.404	0.585	1.560	0.033
Contrôleur ϕ	10	0.001	7.474	0.001
Contrôleur θ	9.731	2.669	0.928	1.331
Contrôleur ψ	4.829	2.976	1.667	1.386

Pour analyser la robustesse et démontrer l'efficacité de loi de commande appliquée à un quadrotor, nous avons utilisé une trajectoire circulaire (figure 2). Le quadrotor prend une masse de charge $m_0 = 500 \text{ g}$ en début de vol, à l'instant 30 sec au point $(x=0, y=4 \text{ et } z=2.5 \text{ m})$, le quadrotor suite une diminution brusque de la charge m_0 et continue de voler jusqu'au point de départ $(x=0, y=0 \text{ et } z=0.5 \text{ m})$. La figure 4 montre la trajectoire désirée et les positions du quadrotor. La figure 5 représente les erreurs de poursuite. Ces résultats montrent la bonne poursuite en positions de $\{x, y, z, \psi\}$ et la stabilisation des angles d'inclinaison $\{\theta, \phi\}$, malgré la présence des interconnexions. L'évaluation du changement de masse illustre dans la figure 3. Les signaux de commande sont lisses et physiquement réalisables (acceptable dans la pratique) (figure 6).

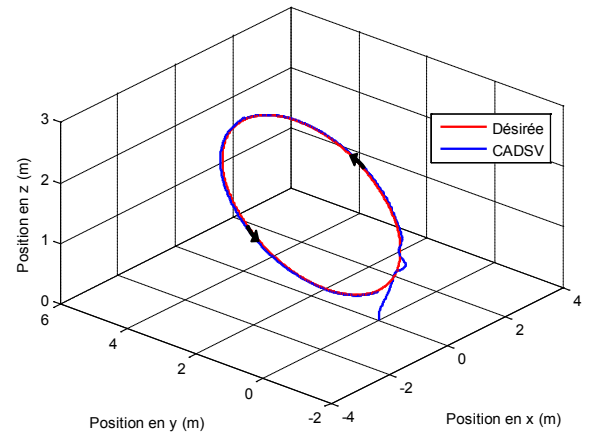


Fig. 2. Trajectoire triangulaire en 3D.

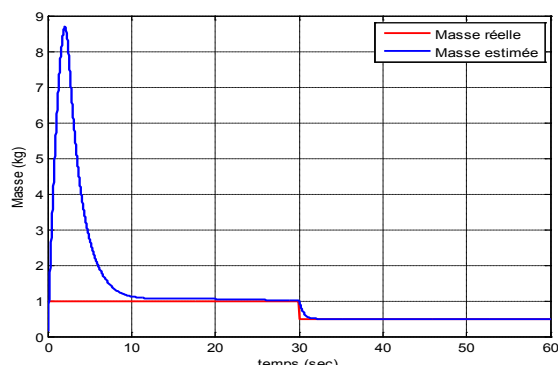


Fig. 3. Variation de masse.

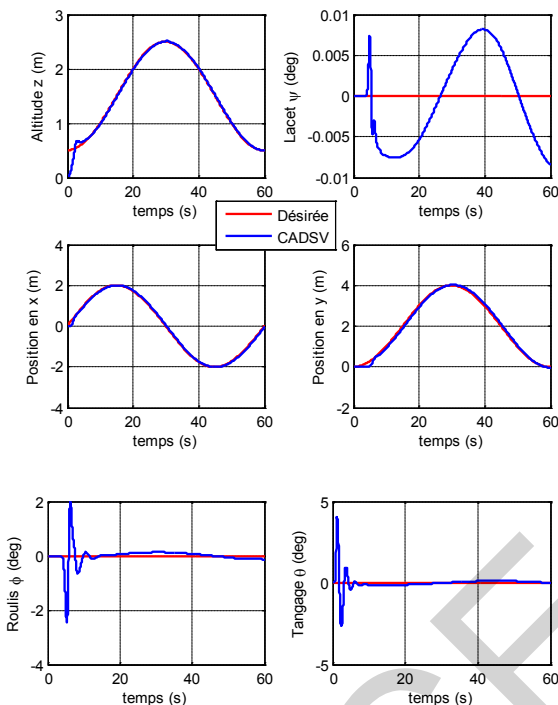


Fig. 4. Position et Attitude du Quadrotor.

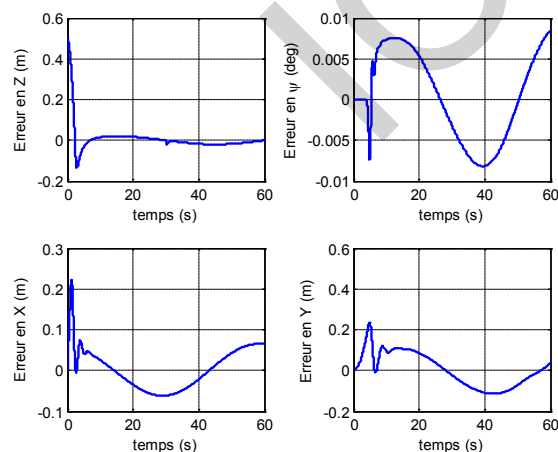


Fig. 5. Erreur de poursuite.

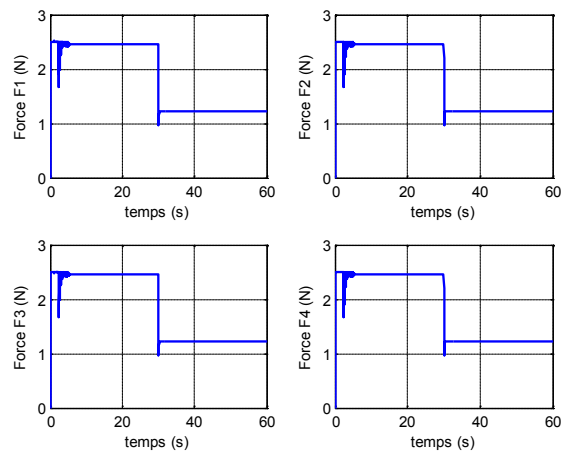


Fig. 6. Signaux de commandes.

V. CONCLUSION

Nous avons étudié et développé la commande adaptative décentralisée pour une classe de systèmes non linéaires de deuxième ordre interconnectés en utilisant la technique du mode glissant. La loi de commande a été synthétisée en considérant les termes non linéaires locaux comme des paramètres inconnus. Ces paramètres estimés en ligne par des lois d'adaptation assurent la stabilité globale du système. On note que cette commande est simple pour l'implémentation et n'exige pas une connaissance parfaite du modèle dynamique du système. La structure générale et les propriétés fondamentales sont nécessaires uniquement. Les résultats de simulation effectuée sur un robot volant ont permis de valider l'analyse théorique et la robustesse vis-à-vis du changement de masse. La commande proposée peut être appliquée à n'importe quel quadrotor avec différentes masses et longueurs.

REFERENCES

- [1] H. Khalil, "Nonlinear Systems", Prentice Hall, 1996.
- [2] J. C. Geromel, "Contribution à l'étude des systèmes dynamiques interconnectés aspects de décentralisation", Ph.D. Paul Sabatier Univ, Toulouse, 1979.
- [3] S. Jain, F. Khorrani et B. Fardanesh, "Decentralized control of large-scale power systems with unknown interconnections", *Int. J. Control*, 63, pp. 591-608, 1996.
- [4] D.T. Gavel et T. C.Hsia, "Decentralized adaptive control of robot manipulators", In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, NC, pp. 1230-1235, 1987.
- [5] T. Madani and A. Benallegue, "Commande adaptative décentralisée à structure variable d'une classe de systèmes non-linéaire interconnectés : Application à un robot volant", *e-STA*, Vol 4, N°2, pp. 39-44, 2007.
- [6] A.R. Benaskeur, "Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires", Ph.D. Laval Univ., Québec, Février 2000.
- [7] A. Hussain, "Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants", Ph.D. Reims Champagne-Ardenne Univ., 2009.
- [8] S. Labiod, T.M. Guerra, "direct adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems with input saturation". Third IFAC Workshop on Advanced Fuzzy and Neural control, 2007
- [9] D. Boukhetala, F. Boudjema, T. Madani, M.S. Boucherit and N.K. M'sirdi, "A new decentralized variable Structure control for robot Manipulators", *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 18, n° 1, pp. 28-40, 2003.
- [10] J.E. Slotine et W. Li, "Applied nonlinear control", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [11] P. Castillo, R. Lozano and A. Dzul, "Modeling and Control of Mini-Flying Machines". New York: Springer-Verlag, 2004, ch. 3.
- [12] A. Mokhtari and A. Benallegue. "Dynamic feedback controller of Euler angles and wind parameters estimation for quadrotor unmanned aerial vehicle". *Proc. of the 2004 IEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2359-2366' 2004.