

Commande et localisation embarquée d'un drone aérien en utilisant la vision

Guillaume Sanahuja

Séminaire SIT55

12 octobre 2010



Plan

- 1 Introduction
- 2 Démonstrateur X4
- 3 Lois de commande
- 4 Estimation et navigation d'un drone en utilisant la vision
- 5 Conclusions

Militaires (UCAV)



Boeing X-45A.



EADS Barracuda.



Dassault nEUROn.

Surveillance



Forces de police.



Trafic routier.



Foules.

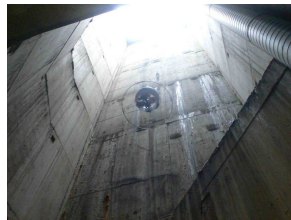
Inspection



Viaduc de l'Eauplet.



Pylône haute tension.



Puits de ventilation.

Ludique



Le Xufo.



Le Mikrokopter.



L' AR Drone de Parrot.

Types de drones



L'avion *Lord 400*.



Le monorotor.



Hélicoptère *Yamaha Rmax*.



Birotor en configuration tandem.



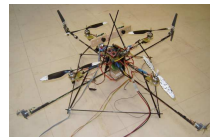
Trirotor.



Le X4 de *Draganfly*.



Le X6 de *Draganfly*.



Octarotor.



Le X8 de *Draganfly*.



Drone convertible
V-Bat de *MLB Company*.



Dirigeable.



Drone à aile battante.

Intérêt de la vision

Orientation

Capteurs inertiels (accéléromètres et gyromètres) + magnétomètres :

- solutions “sur étagère”
- fréquence élevée
- problèmes de dérive

Position

Différentes solutions :

- *GPS* : lent, usage en extérieur, peu précis
- télémètres : rapide, précis dans une direction, nécessite un obstacle
- capteur de vision : information riche mais lourde à traiter

Intérêt de la vision

Orientation

Capteurs inertiels (accéléromètres et gyromètres) + magnétomètres :

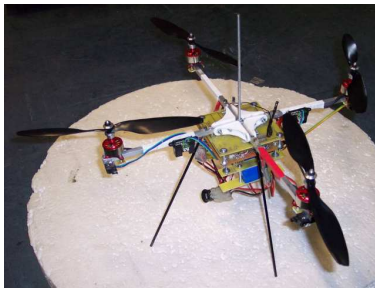
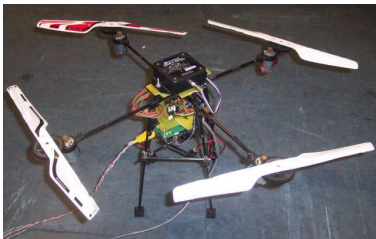
- solutions “sur étagère”
- fréquence élevée
- problèmes de dérive

Position

Différentes solutions :

- *GPS* : lent, usage en extérieur, peu précis
- télémètres : rapide, précis dans une direction, nécessite un obstacle
- capteur de vision : information riche mais lourde à traiter

Démonstrateurs réalisés



Couples et forces

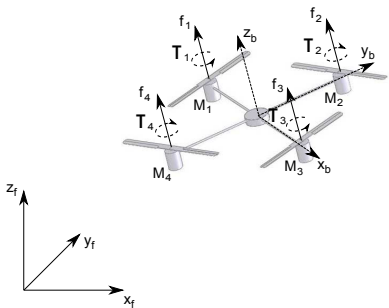


Schéma du quadricoptère.

(Chargement de la vidéo)

[videos/Demo.avi](#)

Modèle dynamique simplifié

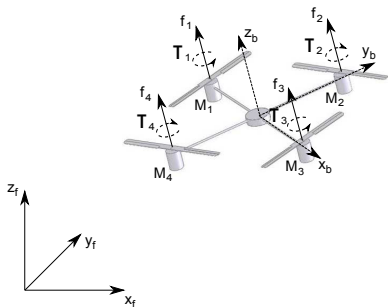


Schéma du quadrirotor.

$$m\ddot{x} = u(\cos \psi \cos \phi \sin \theta + \sin \psi \sin \phi) \quad (1a)$$

$$m\ddot{y} = u(\sin \theta \sin \psi \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \quad (1b)$$

$$m\ddot{z} = u \cos \theta \cos \phi - mg \quad (1c)$$

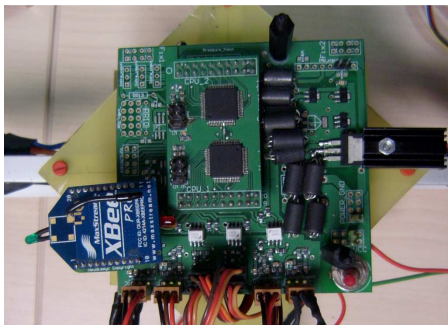
$$\ddot{\phi} = \tilde{\tau}_{\phi} \quad (1d)$$

$$\ddot{\theta} = \tilde{\tau}_{\theta} \quad (1e)$$

$$\ddot{\psi} = \tilde{\tau}_{\psi} \quad (1f)$$

$$R_{fb} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi c\phi s\theta + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\psi c\phi & s\theta s\psi c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

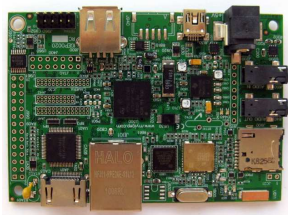
Cartes



Carte électronique.

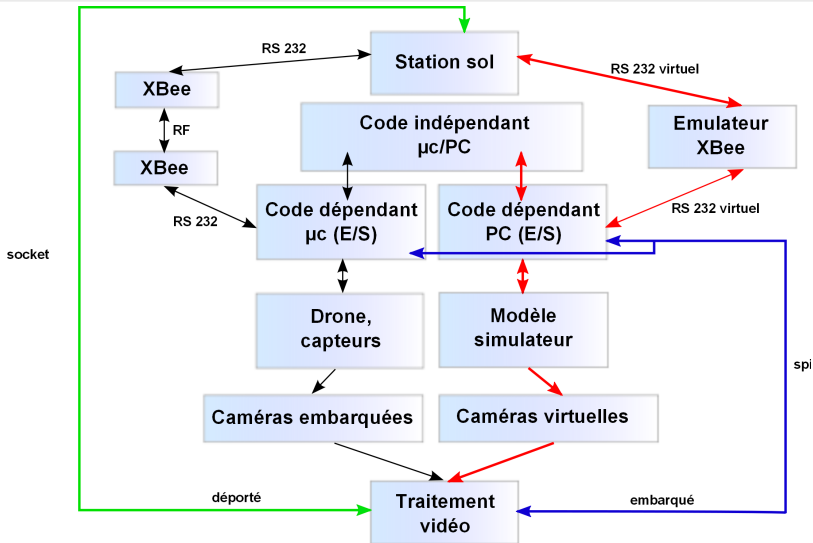


Le *MBS270v1*.



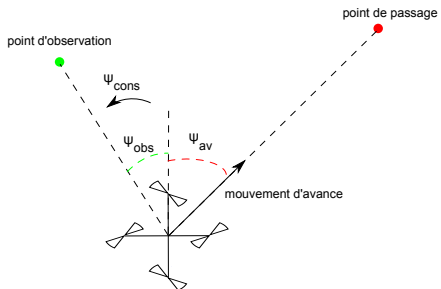
La *IGEPv2*.

Découpage



Architecture informatique.

Simulateur : vol par coordonnées GPS



Vol par coordonnées GPS.

- vol par points de passages GPS (épreuve concours Onera/DGA)
- ajout d'un point d'observation
- tirer profit des DDL du X4
- caméra fixe dans le drone

Simulateur : vol par coordonnées *GPS*

(Chargement de la vidéo)

videos/gps_50.avi

Banc B20, concours Onera/DGA

(Chargement de la vidéo)

`videos/x4_b20.wmv`

Présentation

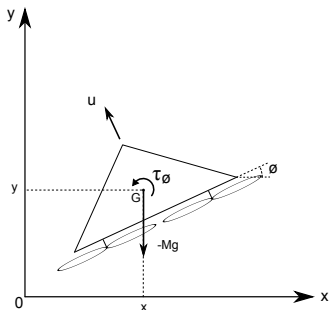


Schéma du PVTOL.

- *Planar Vertical Take Off and Landing*
- modèle simplifié du quadrirotor
- système sous actionné
- comparaisons de lois de commandes

Modèle dynamique simplifié

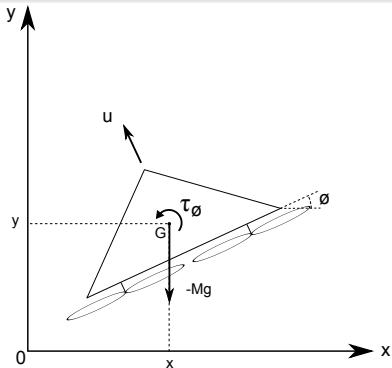


Schéma du PVTOL.

Force et moment :

$$u = f_1 + f_2 \quad (3a)$$

$$\tau_\phi = l(f_1 - f_2) \quad (3b)$$

D'où,

$$M\ddot{x} = -u \sin \phi + \varepsilon \tau_\phi \cos \phi \quad (4a)$$

$$M\ddot{y} = u \cos \phi + \varepsilon \tau_\phi \sin \phi - Mg \quad (4b)$$

$$J\ddot{\phi} = \tau_\phi \quad (4c)$$

\Rightarrow
[?]

$$M\ddot{x} = -u \sin \phi \quad (5a)$$

$$M\ddot{y} = u \cos \phi - Mg \quad (5b)$$

$$J\ddot{\phi} = \tau_\phi \quad (5c)$$

Préliminaires : stabilisation de l'altitude

Proposons :

$$u = \frac{-a_1 \dot{y} - a_2 (y - y_d) + Mg}{\cos \phi} \quad (6)$$

Le système devient :

$$M\ddot{x} = - \left(-a_1 \dot{y} - a_2 (y - y_d) + Mg \right) \tan \phi \quad (7a)$$

$$M\ddot{y} = -a_1 \dot{y} - a_2 (y - y_d) \quad (7b)$$

$$J\ddot{\phi} = \tau_\phi \quad (7c)$$

Ainsi, après un temps T suffisamment grand, y et \dot{y} sont arbitrairement petits, et (7a) se réduit à :

$$\ddot{x} = -g \tan \phi \quad (8)$$

Loi de commande linéaire

En posant $X = [x, \dot{x}, \phi, \dot{\phi}]^T$, le système linéarisé s'écrit alors :

$$\dot{X} = AX + B\tau_L\phi \quad (9)$$

avec :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J \end{bmatrix} \quad (10)$$

En posant la loi de commande suivante :

$$\tau_L\phi = -KX \quad (11)$$

alors,

$$\dot{X} = (A - BK)X = \bar{A}X \quad (12)$$

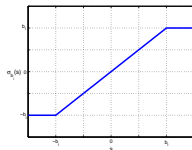
Loi de commande par saturations emboîtées

Loi proposée par [?], preuve par Lyapunov à partir du modèle non linéaire.

$$\tau_{NS_\phi} = -J\sigma_{b_1} \left[\dot{\phi} + \sigma_{b_2} \left(\phi + \dot{\phi} + \sigma_{b_3} \left(2\phi + \dot{\phi} - \frac{\dot{x}}{g} + \sigma_{b_4} \left(\dot{\phi} + 3\phi - 3\frac{\dot{x}}{g} - \frac{x}{g} \right) \right) \right) \right] \quad (13)$$

avec,

$$\sigma_{b_i}(s) = \begin{cases} b_i & \text{si } s > b_i \\ s & \text{si } -b_i \leq s \leq b_i \\ -b_i & \text{si } s < -b_i \end{cases} \quad (14)$$



Fonction de saturation.

Les bornes b_i des fonctions de saturations doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$b_1 \geq 4b_3 + 3\delta \quad (15a)$$

$$b_2 \geq 2b_3 + \delta \quad (15b)$$

$$1 \geq b_3 + 2\delta \quad (15c)$$

$$b_3 \geq 7(b_3 + 2\delta)^2 + 3\delta \quad (15d)$$

$$b_4 \geq 3(b_3 + 2\delta)^2 + \delta \quad (15e)$$

Loi de commande par saturations séparées

Loi proposée par [?], preuve par Lyapunov à partir du modèle non linéaire.

$$\tau_{S_\phi} = -J \left(\sigma_{b_4}(k_4 z_4) + \sigma_{b_3}(k_3 z_3) + \sigma_{b_2}(k_2 z_2) + \sigma_{b_1}(k_1 z_1) \right) \quad (16)$$

avec,

$$z_1 = z_2 + k_2 \phi - \frac{k_2 k_3 k_4}{g} x - \frac{k_2 (k_3 + k_4)}{g} \dot{x} \quad (17a)$$

$$z_2 = z_3 + k_3 \dot{\phi} - \frac{k_3 k_4}{g} \dot{x} \quad (17b)$$

$$z_3 = k_4 \phi + \dot{\phi} \quad (17c)$$

$$z_4 = \dot{\phi} \quad (17d)$$

Loi de commande par saturations séparées

Les bornes b_i des fonctions de saturations et les gains k_i doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$b_1 > k_5 \left(\frac{b_1 + b_2}{k_3 k_4} + \delta \right)^2 \quad (18a)$$

$$1 \geq \frac{b_1 + b_2}{k_3 k_4} + \delta \quad (18b)$$

$$b_2 > k_3 k_4 \left(\frac{b_1 + b_2}{k_3 k_4} + \delta \right)^2 \quad (18c)$$

$$b_3 > b_1 + b_2 \quad (18d)$$

$$b_4 > b_1 + b_2 + b_3 \quad (18e)$$

$$\frac{k_3 k_4}{2k_5 + k_3 k_4} > \frac{b_1 + b_2}{k_3 k_4} + \delta \quad (18f)$$

où :

$$k_5 = k_2 k_3 + k_2 k_4 + k_3 k_4 \quad (19)$$

Loi de commande par *backstepping*

Systèmes de type *feedforward* (ou triangulaires supérieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_2, x_3, \dots, x_n, u) \quad (20a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_3, \dots, x_n, u) \quad (20b)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(u) \quad (20c)$$

Systèmes de type *feedback* (ou triangulaires inférieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (21a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (21b)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) \quad (21c)$$

Le modèle non linéaire du *PVTOL* est adapté aux techniques de *forwarding* ou de *backstepping* :

$$\tau_{B\phi} = J \left(\frac{k_1 x_1 + k_2 x_2 - k_3 g \tan \phi_1}{g(1 + \tan^2 \phi_1)} - k_4 \phi_2 - 2\phi_2^2 \tan \phi_1 \right) \quad (22)$$

Loi de commande par *backstepping*

Systèmes de type *feedforward* (ou triangulaires supérieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_2, x_3, \dots, x_n, u) \quad (20a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_3, \dots, x_n, u) \quad (20b)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(u) \quad (20c)$$

Systèmes de type *feedback* (ou triangulaires inférieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (21a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (21b)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) \quad (21c)$$

Le modèle non linéaire du *PVTOL* est adapté aux techniques de *forwarding* ou de *backstepping* :

$$\tau_{B\phi} = J \left(\frac{k_1 x_1 + k_2 x_2 - k_3 g \tan \phi_1}{g(1 + \tan^2 \phi_1)} - k_4 \phi_2 - 2\phi_2^2 \tan \phi_1 \right) \quad (22)$$

Loi de commande par *backstepping*

Systèmes de type *feedforward* (ou triangulaires supérieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_2, x_3, \dots, x_n, u) \quad (20a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_3, \dots, x_n, u) \quad (20b)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(u) \quad (20c)$$

Systèmes de type *feedback* (ou triangulaires inférieurs)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (21a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) \quad (21b)$$

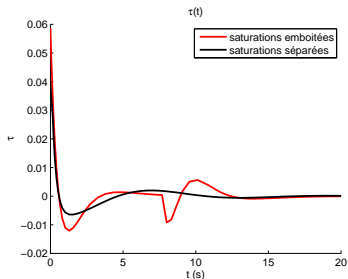
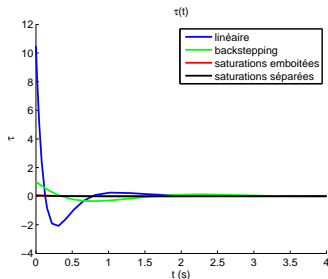
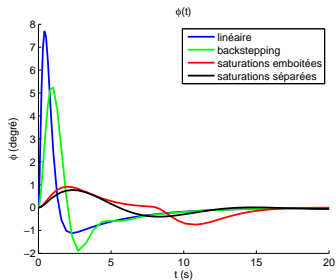
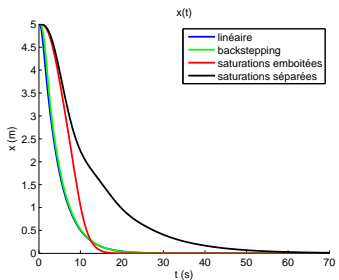
$$\vdots$$

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u) \quad (21c)$$

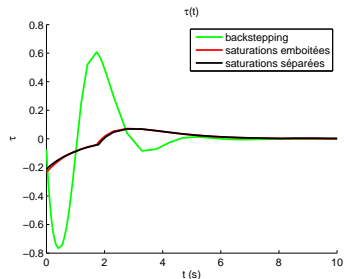
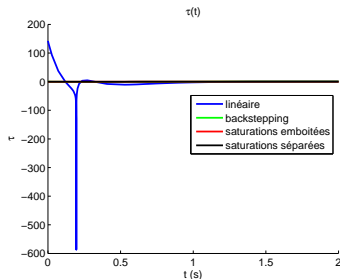
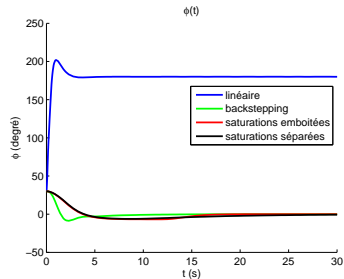
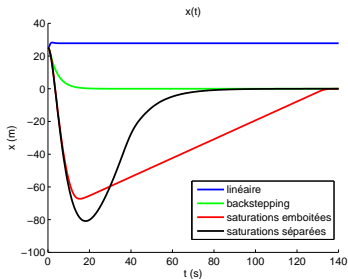
Le modèle non linéaire du *PVTOL* est adapté aux techniques de *forwarding* ou de *backstepping* :

$$\tau_{B\phi} = J \left(\frac{k_1 x_1 + k_2 x_2 - k_3 g \tan \phi_1}{g(1 + \tan^2 \phi_1)} - k_4 \phi_2 - 2\phi_2^2 \tan \phi_1 \right) \quad (22)$$

Simulations : $x_0 = 5$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = 0$, $\dot{\phi}_0 = 0$



Simulations : $x_0 = 25$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = \pi/6$, $\dot{\phi}_0 = 0$



Simulations : $x_0 = 25$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = \pi/6$, $\dot{\phi}_0 = 0$

(Chargement de la vidéo)

`videos/comp1_15.avi`

Conclusions

Simulations

- bons résultats dans l'ensemble
- lois par saturations mieux adaptées

Expériences

- plus difficiles à comparer
- loi par *backstepping* n'a pas pu être réglée
- réglage des gains peut être difficile

Constat

- intérêt d'une loi générale dont les gains ne jouent que sur un état

Conclusions

Simulations

- bons résultats dans l'ensemble
- lois par saturations mieux adaptées

Expériences

- plus difficiles à comparer
- loi par *backstepping* n'a pas pu être réglée
- réglage des gains peut être difficile

Constat

- intérêt d'une loi générale dont les gains ne jouent que sur un état

Conclusions

Simulations

- bons résultats dans l'ensemble
- lois par saturations mieux adaptées

Expériences

- plus difficiles à comparer
- loi par *backstepping* n'a pas pu être réglée
- réglage des gains peut être difficile

Constat

- intérêt d'une loi générale dont les gains ne jouent que sur un état

Définition

Soit le système à n intégrateurs,

$$\dot{x}_1 = \alpha_1 x_2 \quad (23a)$$

$$\vdots$$

$$\dot{x}_{n-1} = \alpha_{n-1} x_n \quad (23b)$$

$$\dot{x}_n = \alpha_n u \quad (23c)$$

$$\implies$$

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (24a)$$

$$\vdots$$

$$\dot{y}_n = u' \quad (24b)$$

où $\alpha_i \neq 0$ constant, $\forall i \in [1, n]$.

Avec le changement de variable :

$$y_1 = x_1 \quad (25a)$$

$$y_2 = \alpha_1 x_2 \quad (25b)$$

$$\vdots$$

$$y_n = \alpha_1 \dots \alpha_{n-1} x_n \quad (25c)$$

$$u' = \alpha_1 \dots \alpha_n u \quad (25d)$$

Loi de commande

Loi de commande proposée :

$$u' = - \sum_{i=1}^n \sigma_{b_i}(k_i y_i) \quad (26)$$

En posant,

$$\xi_i = \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{b_j}(k_j y_j) \quad (27)$$

L'équation (26) peut alors s'écrire :

$$u' = - \sum_{j=i}^n \sigma_{b_j}(k_j y_j) - \xi_i \quad (28)$$

Proposition P_i

$\forall i \in [1, n], \exists$ un temps T_{n-i+1} suffisamment grand tel que $\forall t > T_{n-i+1}$,
 $u' = - \sum_{j=i}^n k_j y_j - \xi_i$ et $|y_i|$ est borné.

Loi de commande

Loi de commande proposée :

$$u' = - \sum_{i=1}^n \sigma_{b_i}(k_i y_i) \quad (26)$$

En posant,

$$\xi_i = \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_{b_j}(k_j y_j) \quad (27)$$

L'équation (26) peut alors s'écrire :

$$u' = - \sum_{j=i}^n \sigma_{b_j}(k_j y_j) - \xi_i \quad (28)$$

Proposition P_i

$\forall i \in [1, n], \exists$ un temps T_{n-i+1} suffisamment grand tel que $\forall t > T_{n-i+1}$,
 $u' = - \sum_{j=i}^n k_j y_j - \xi_i$ et $|y_i|$ est borné.

Démonstration de P_i par récurrence

Première étape, $i = n$

$$u' = -k_n y_n - \xi_n, \forall t > T_1 \quad (29)$$

Seconde étape

En supposant que P_i est vraie pour un i donné, on montre que P_{i-1} est aussi vraie.

Conclusion du théorème de récurrence

Il existe un temps T_n tel que $\forall t > T_n$,

avec,

$$u' = - \sum_{i=1}^n k_i y_i \quad (30)$$

$$\frac{b_{\xi_i}}{k_i} > \frac{b_{z_{i+1}}}{k_{i+1}}, \forall i \in [2, n-1] \quad (31a)$$

$$\frac{b_1}{k_1} > \frac{b_{z_2}}{k_2} \quad (31b)$$

$$b_i > b_{\xi_i}, \forall i \in [2, n] \quad (31c)$$

$$b_{\xi_i} = \sum_{j=2}^i b_{j-1} \quad (32a)$$

$$b_{z_i} = \sum_{j=i}^{n-1} \frac{k_{j+1} b_{\xi_j}}{k_j} + \frac{b_{\xi_n}}{k_n} \quad (32b)$$

Démonstration de P_i par récurrence

Première étape, $i = n$

$$u' = -k_n y_n - \xi_n, \forall t > T_1 \quad (29)$$

Seconde étape

En supposant que P_i est vraie pour un i donné, on montre que P_{i-1} est aussi vraie.

Conclusion du théorème de récurrence

Il existe un temps T_n tel que $\forall t > T_n$,

avec,

$$u' = - \sum_{i=1}^n k_i y_i \quad (30)$$

$$\frac{b_{\xi_i}}{k_i} > \frac{b_{z_{i+1}}}{k_{i+1}}, \forall i \in [2, n-1] \quad (31a)$$

$$\frac{b_1}{k_1} > \frac{b_{z_2}}{k_2} \quad (31b)$$

$$b_i > b_{\xi_i}, \forall i \in [2, n] \quad (31c)$$

$$b_{\xi_i} = \sum_{j=2}^i b_{j-1} \quad (32a)$$

$$b_{z_i} = \sum_{j=i}^{n-1} \frac{k_{j+1} b_{\xi_j}}{k_j} + \frac{b_{\xi_n}}{k_n} \quad (32b)$$

Démonstration de P_i par récurrence

Première étape, $i = n$

$$u' = -k_n y_n - \xi_n, \forall t > T_1 \quad (29)$$

Seconde étape

En supposant que P_i est vraie pour un i donné, on montre que P_{i-1} est aussi vraie.

Conclusion du théorème de récurrence

Il existe un temps T_n tel que $\forall t > T_n$,

avec,

$$u' = - \sum_{i=1}^n k_i y_i \quad (30)$$

$$\frac{b_{\xi_i}}{k_i} > \frac{b_{z_{i+1}}}{k_{i+1}}, \forall i \in [2, n-1] \quad (31a)$$

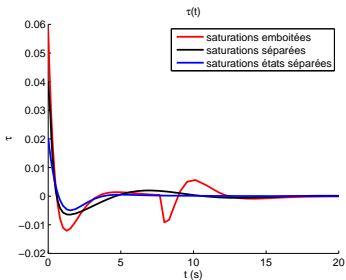
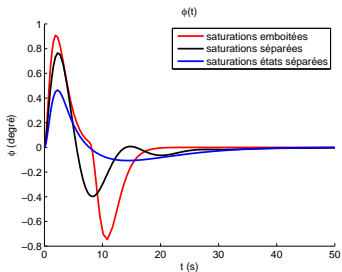
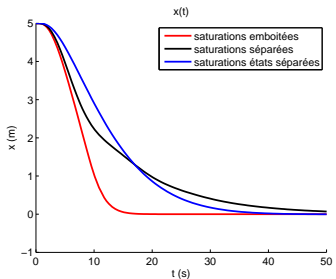
$$\frac{b_1}{k_1} > \frac{b_{z_2}}{k_2} \quad (31b)$$

$$b_i > b_{\xi_i}, \forall i \in [2, n] \quad (31c)$$

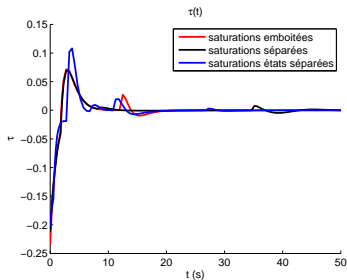
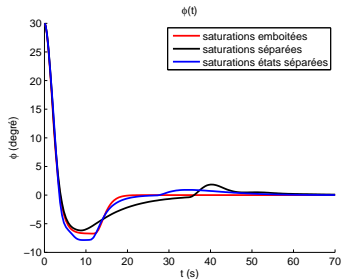
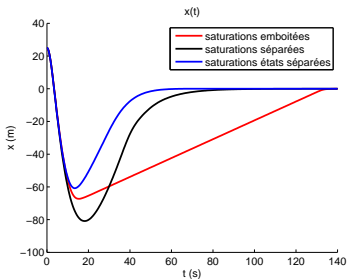
$$b_{\xi_i} = \sum_{j=2}^i b_{j-1} \quad (32a)$$

$$b_{z_i} = \sum_{j=i}^{n-1} \frac{k_{j+1} b_{\xi_j}}{k_j} + \frac{b_{\xi_n}}{k_n} \quad (32b)$$

Simulations : $x_0 = 5$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = 0$, $\dot{\phi}_0 = 0$



Simulations : $x_0 = 25$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = \pi/6$, $\dot{\phi}_0 = 0$



Simulations : $x_0 = 25$, $\dot{x}_0 = 0$, $\phi_0 = \pi/6$, $\dot{\phi}_0 = 0$

(Chargement de la vidéo)

videos/comp2_15.avi

Conclusions

Loi de commande par saturations séparées

- stabiliser un système linéaire ayant n intégrateurs en cascade
- une fonction de saturation par état
- facilité de réglage des gains
- conditions sur les gains, de même que pour les autres lois
- simulations montrent des performances comparables
- validation expérimentale (*PVTOL*)
- loi retenue pour le quadrirotor

Modèle de la caméra perspective

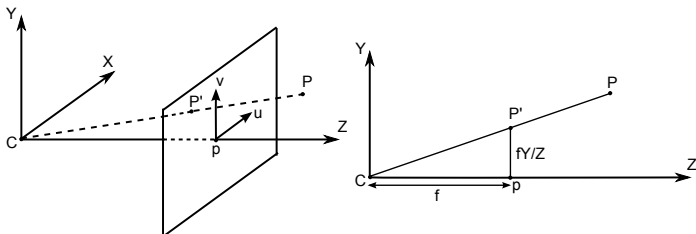
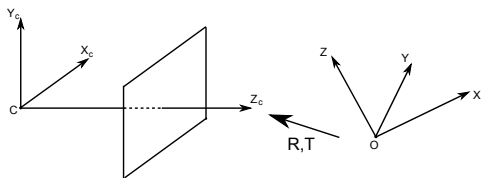


Schéma de la caméra perspective.

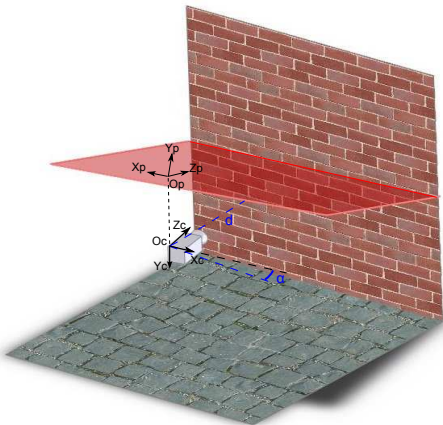


Rotation et translation de la caméra.

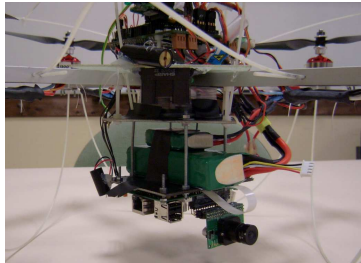
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ Z \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (33a)$$

$$K = \begin{bmatrix} f_u & s & p_u \\ 0 & f_v & p_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33b)$$

Présentation



Laser ligne et caméra.

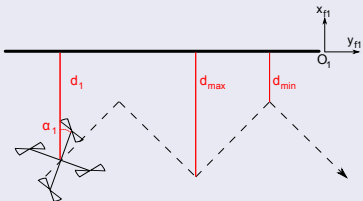


Drone équipé du laser et de la caméra.

- calibration grâce à R et T de la mire
- calcul de l'angle et de la distance
- fonctionne sur plusieurs murs
- application de suivi de mur

Algorithme de commande

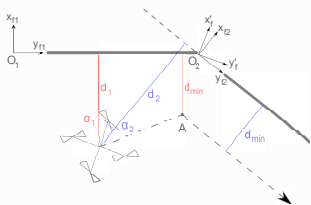
Un seul mur visible



Déplacement du quadrirotor.

- asservissement de l'angle par rapport au mur, $\psi = \alpha_1$
- déplacement en zig-zag grâce à la distance d_1
- “boucle ouverte” sur y

Deux murs visibles

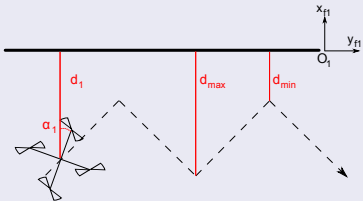


Déplacement du quadrirotor.

- 1 alignement avec le mur 2, $\psi = \alpha_2$
rapprochement, $d_1 = d_2 = d_{min}$
- 2 d_2 maintenue à d_{min}
 d_1 augmente progressivement
- 3 dès que le mur 1 disparaît, retour au cas “un seul mur visible”

Algorithme de commande

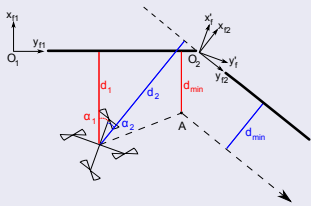
Un seul mur visible



Déplacement du quadrirotor.

- asservissement de l'angle par rapport au mur, $\psi = \alpha_1$
- déplacement en zig-zag grâce à la distance d_1
- “boucle ouverte” sur y

Deux murs visibles



Déplacement du quadrirotor.

- 1 alignement avec le mur 2, $\psi = \alpha_2$
rapprochement, $d_1 = d_2 = d_{min}$
- 2 d_2 maintenue à d_{min}
 d_1 augmente progressivement
- 3 dès que le mur 1 disparaît, retour au cas “un seul mur visible”

Lois de commande

$$\tau_{z_b} = -I_{b_{zz}} \left(\sigma_{p\psi} (k_{p\psi} \psi) + \sigma_{d\psi} (k_{d\psi} \dot{\psi}) \right) \quad (34a)$$

$$\tau_{y_b} = -\frac{I_{b_{yy}}}{g} \left[\sigma_{px} \left(k_{px} (x - x_d) \right) + \sigma_{dx} (k_{dx} \dot{x}) + \sigma_{p\theta} (k_{p\theta} g \theta) + \sigma_{d\theta} (k_{d\theta} g \dot{\theta}) \right] \quad (34b)$$

$$\tau_{x_b} = \frac{I_{b_{xx}}}{g} \left[\sigma_{py} \left(k_{py} (y - y_d) \right) + \sigma_{dy} (k_{dy} \dot{y}) - \sigma_{p\phi} (k_{p\phi} g \phi) - \sigma_{d\phi} (k_{d\phi} g \dot{\phi}) \right] \quad (34c)$$

Un seul mur visible

Les positions de consignes x_d et y_d passent alternativement de d_{min} à d_{max} , et :

$$x = d_1 \quad (35a) \quad y = d_1 \quad (35b) \quad \dot{y} = \dot{x} \quad (35c)$$

Deux murs visibles

$$x - x_d = x_A c_{\alpha_2} + y_A s_{\alpha_2} \quad (36a) \quad y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - d_{min}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37a)$$

$$y - y_d = -x_A s_{\alpha_2} + y_A c_{\alpha_2} \quad (36b)$$

$$x_A = d_2 - d_{min} \quad (36c)$$

$$y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - (d_{min} + kt)}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37b)$$

Lois de commande

$$\tau_{z_b} = -I_{b_{zz}} \left(\sigma_{p\psi} (k_{p\psi} \psi) + \sigma_{d\psi} (k_{d\psi} \dot{\psi}) \right) \quad (34a)$$

$$\tau_{y_b} = -\frac{I_{b_{yy}}}{g} \left[\sigma_{px} \left(k_{px} (x - x_d) \right) + \sigma_{dx} (k_{dx} \dot{x}) + \sigma_{p\theta} (k_{p\theta} g \theta) + \sigma_{d\theta} (k_{d\theta} g \dot{\theta}) \right] \quad (34b)$$

$$\tau_{x_b} = \frac{I_{b_{xx}}}{g} \left[\sigma_{py} \left(k_{py} (y - y_d) \right) + \sigma_{dy} (k_{dy} \dot{y}) - \sigma_{p\phi} (k_{p\phi} g \phi) - \sigma_{d\phi} (k_{d\phi} g \dot{\phi}) \right] \quad (34c)$$

Un seul mur visible

Les positions de consignes x_d et y_d passent alternativement de d_{min} à d_{max} , et :

$$x = d_1 \quad (35a) \quad y = d_1 \quad (35b) \quad \dot{y} = \dot{x} \quad (35c)$$

Deux murs visibles

$$x - x_d = x_A c_{\alpha_2} + y_A s_{\alpha_2} \quad (36a) \quad y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - d_{min}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37a)$$

$$y - y_d = -x_A s_{\alpha_2} + y_A c_{\alpha_2} \quad (36b)$$

$$x_A = d_2 - d_{min} \quad (36c)$$

$$y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - (d_{min} + kt)}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37b)$$

Lois de commande

$$\tau_{z_b} = -I_{b_{zz}} \left(\sigma_{p\psi} (k_{p\psi} \psi) + \sigma_{d\psi} (k_{d\psi} \dot{\psi}) \right) \quad (34a)$$

$$\tau_{y_b} = -\frac{I_{b_{yy}}}{g} \left[\sigma_{px} \left(k_{px} (x - x_d) \right) + \sigma_{dx} (k_{dx} \dot{x}) + \sigma_{p\theta} (k_{p\theta} g \theta) + \sigma_{d\theta} (k_{d\theta} g \dot{\theta}) \right] \quad (34b)$$

$$\tau_{x_b} = \frac{I_{b_{xx}}}{g} \left[\sigma_{py} \left(k_{py} (y - y_d) \right) + \sigma_{dy} (k_{dy} \dot{y}) - \sigma_{p\phi} (k_{p\phi} g \phi) - \sigma_{d\phi} (k_{d\phi} g \dot{\phi}) \right] \quad (34c)$$

Un seul mur visible

Les positions de consignes x_d et y_d passent alternativement de d_{min} à d_{max} , et :

$$x = d_1 \quad (35a) \quad y = d_1 \quad (35b) \quad \dot{y} = \dot{x} \quad (35c)$$

Deux murs visibles

$$x - x_d = x_A c_{\alpha_2} + y_A s_{\alpha_2} \quad (36a) \quad y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - d_{min}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37a)$$

$$y - y_d = -x_A s_{\alpha_2} + y_A c_{\alpha_2} \quad (36b)$$

$$x_A = d_2 - d_{min} \quad (36c)$$

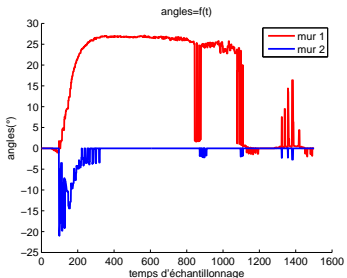
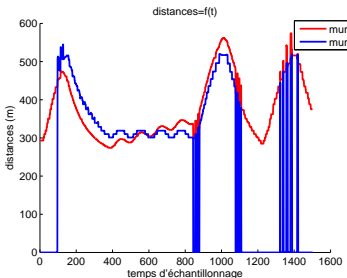
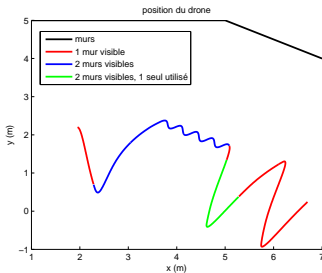
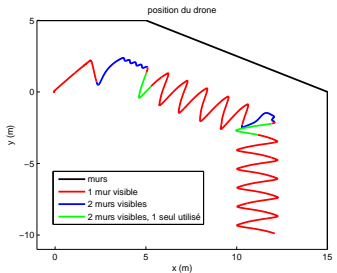
$$y_A = \frac{c_{(\alpha_1 - \alpha_2)}}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} x_A - \frac{d_1 - (d_{min} + kt)}{s_{(\alpha_1 - \alpha_2)}} \quad (37b)$$

Simulations

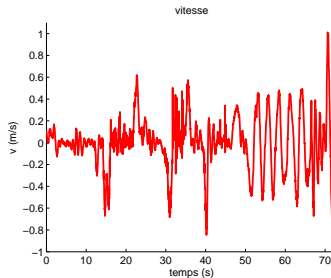
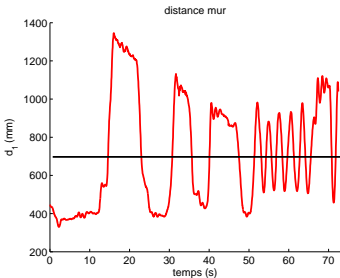
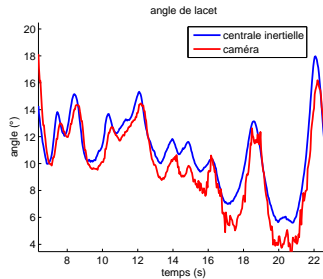
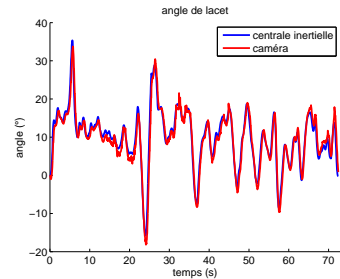
(Chargement de la vidéo)

`videos/suivi 50.avi`

Simulations



Expériences



Expériences

(Chargement de la vidéo)

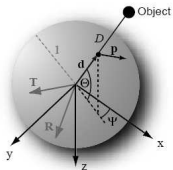
`videos/vol_laser.wmv`

Conclusions

Système laser ligne

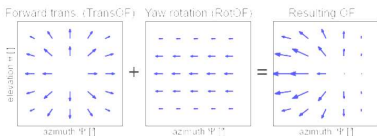
- validation de l'algorithme de suivi de mur en simulation
- comparaison de l'angle de lacet avec la centrale \Rightarrow pas de dérive
- fonctionnement à 30 Hz en embarqué \Rightarrow possible pour l'angle de lacet
- difficultés pour la position et la vitesse
- expériences à continuer

Présentation



$$p(\psi, \theta) = - \frac{T - (T^T d(\psi, \theta)) d(\psi, \theta)}{D(\psi, \theta)} - [R]_{\times} d(\psi, \theta) \quad (38)$$

Caméra sphérique.

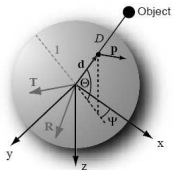


Superposition du flux optique translationnel et rotationnel.



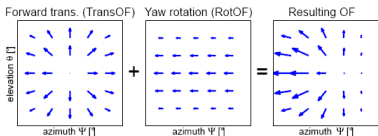
Problème d'ouverture.

Présentation



$$p(\psi, \theta) = - \frac{T - (T^T d(\psi, \theta)) d(\psi, \theta)}{D(\psi, \theta)} - [R]_{\times} d(\psi, \theta) \quad (38)$$

Caméra sphérique.

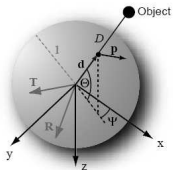


Superposition du flux optique
translational et rotationnel.



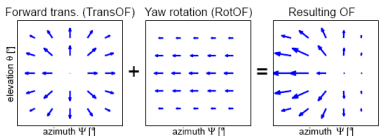
Problème d'ouverture.

Présentation

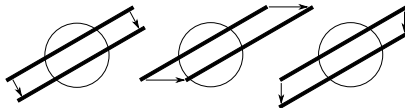


$$p(\psi, \theta) = - \frac{T - (T^T d(\psi, \theta)) d(\psi, \theta)}{D(\psi, \theta)} - [R]_{\times} d(\psi, \theta) \quad (38)$$

Caméra sphérique.



Superposition du flux optique translationnel et rotationnel.



Problème d'ouverture.

e-puck

(Chargement de la vidéo)

videos/SL741810 ok.AVI

Implémentation sur DSP

System On Chip OMAP3530 de TI

- ARM Cortex A8, 720Mhz
- DSP C64x+, 520Mhz (virgule fixe)

Algorithme

- détection de points remarquables : Harris
- Lucas Kanade pyramidal

Résultats

- 60Hz, images en 320x240
- 2 pyramides
- 64 points

Implémentation sur DSP

System On Chip OMAP3530 de TI

- ARM Cortex A8, 720Mhz
- DSP C64x+, 520Mhz (virgule fixe)

Algorithme

- détection de points remarquables : Harris
- Lucas Kanade pyramidal

Résultats

- 60Hz, images en 320x240
- 2 pyramides
- 64 points

Implémentation sur DSP

System On Chip OMAP3530 de TI

- ARM Cortex A8, 720Mhz
- DSP C64x+, 520Mhz (virgule fixe)

Algorithme

- détection de points remarquables : Harris
- Lucas Kanade pyramidal

Résultats

- 60Hz, images en 320x240
- 2 pyramides
- 64 points

X4

(Chargement de la vidéo)

videos/SL742769 dec att.AVI

Conclusions

Flux optique

- embarquable dans un *DSP*
- bonne mesure des vitesses latérales
- prendre en compte les vitesses de rotation angulaires
- à coupler avec une mesure de position
- expériences à continuer (projet Naviflow)

Conclusions

Commande

- étude de différentes lois de commandes
- proposition d'une méthode pour stabiliser un système à n intégrateurs par saturations

Démonstrateur

- réalisation d'un démonstrateur complet, et présentation lors du concours *Onera/DGA*
- réalisation d'un simulateur sur PC

Vision

- systèmes de vision par pointeurs lasers
- implémentation du flux optique sur un *DSP*

Conclusions

Commande

- étude de différentes lois de commandes
- proposition d'une méthode pour stabiliser un système à n intégrateurs par saturations

Démonstrateur

- réalisation d'un démonstrateur complet, et présentation lors du concours *Onera/DGA*
- réalisation d'un simulateur sur PC

Vision

- systèmes de vision par pointeurs lasers
- implémentation du flux optique sur un *DSP*

Conclusions

Commande

- étude de différentes lois de commandes
- proposition d'une méthode pour stabiliser un système à n intégrateurs par saturations

Démonstrateur

- réalisation d'un démonstrateur complet, et présentation lors du concours *Onera/DGA*
- réalisation d'un simulateur sur PC

Vision

- systèmes de vision par pointeurs lasers
- implémentation du flux optique sur un *DSP*

Perspectives

Commande

- utilisation de modèles plus complets
- adaptation des lois de commandes
- étude plus approfondie de l'estimation d'attitude

Démonstrateur

- amélioration commande des moteurs
- aller vers une architecture plus ouverte

Vision

- soc *OMAP 3530* prometteur, mais déjà dépassé (*DM 3730*)
- portage d'autres algorithmes sur *DSP*

Perspectives

Commande

- utilisation de modèles plus complets
- adaptation des lois de commandes
- étude plus approfondie de l'estimation d'attitude

Démonstrateur

- amélioration commande des moteurs
- aller vers une architecture plus ouverte

Vision

- *soc OMAP 3530* prometteur, mais déjà dépassé (*DM 3730*)
- portage d'autres algorithmes sur *DSP*

Perspectives

Commande

- utilisation de modèles plus complets
- adaptation des lois de commandes
- étude plus approfondie de l'estimation d'attitude

Démonstrateur

- amélioration commande des moteurs
- aller vers une architecture plus ouverte

Vision

- soc *OMAP 3530* prometteur, mais déjà dépassé (*DM 3730*)
- portage d'autres algorithmes sur *DSP*