Transport de charge par tricoptère

Étienne Servais

Sous la direction de:
Brigitte d'Andréa-Novel au CAOR
Hugues Mounier au L2S

10 avril 2014

Sommaire

Sommaire

Objectifs

Faire collaborer un système multi-agents

- robots ;
- navires ;
- drones ;

Cela leur permet de réaliser des tâches comme :

- observation ;
- construction ;
- transport de charges lourdes ;

Sommaire

Nous imposons certaines contraintes géométriques :

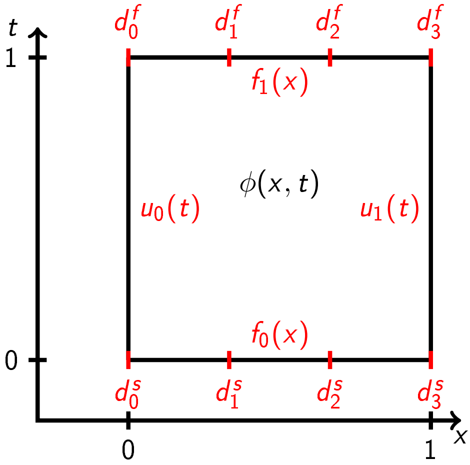


Figure : Points de contrôle et formations.

Équation de Burgers

$$v_t + v_x v = \mu v_{xx}, t > 0, x \in [0\,;1]$$

Équation de Burgers

$$v_t + v_x v = \mu v_{xx}, t > 0, x \in [0\,;1]$$

1. équation aux dérivées partielles (**EDP**) ;
2. fluide en écoulement laminaire ;
3. non linéaire, permet des chocs.

Équation de Burgers

$$v_t + v_x v = \mu v_{xx}, t > 0, x \in [0\,;1]$$

1. équation aux dérivées partielles (**EDP**) ;
2. fluide en écoulement laminaire ;
3. non linéaire, permet des chocs.

Nous transformons l'équation de Burgers en équation de la chaleur :

$$u = -2\mu \frac{v_x}{v}, u_t = \mu u_{xx}$$

L'équation de la chaleur avec deux contrôles aux bords est plate :

$$\phi(x,t) = (C_x T_1 - T_x C_1)\phi_0(t) - (C_x T_0 - T_x C_0)\phi_1(t)$$

Avec :

$$C_x = \operatorname{ch}\left(x\sqrt{\frac{s}{\mu}}\right), S_x = \sqrt{\frac{\mu}{s}}\operatorname{sh}\left(x\sqrt{\frac{s}{\mu}}\right), T_x = S_x(S_1)^{-1}$$

Nous pouvons donc générer les trajectoires que nous voulons (en respectant certaines contraintes).

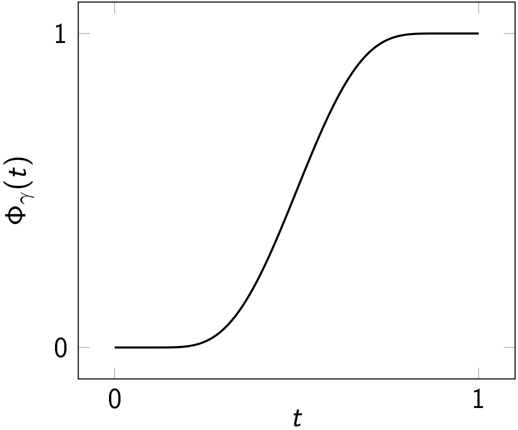


Figure : Solution de base non analytique

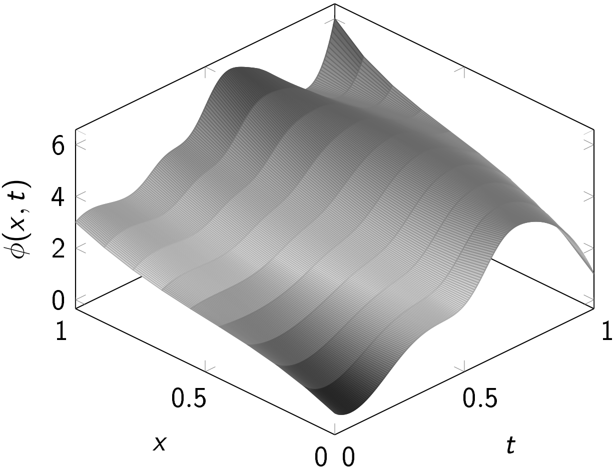


Figure : Exemple de trajectoires (1D).

Figure : Trajectoires de deux robots dans le plan ($\gamma = 1.5$)

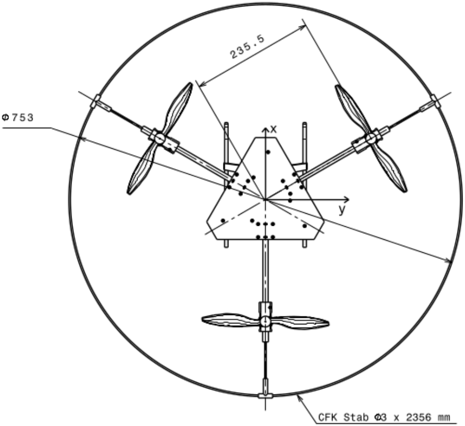
Travail présenté dans :

[1] E. Servais, B. d'Andréa Novel, and H. Mounier, "Motion Planning for Multi-Agent Systems Using Gevrey Trajectories Based on Burgers' Viscous Equation," in *19th IFAC World Congress, Cap Town*

Sommaire

Le tricoptère du LSR

Développé au *Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik* de Saarbrücken par David Kastelan sous la direction de prof. J. Rudolph.



Un tricoptère, pourquoi ?

- 6 contrôles indépendants : translations possibles.

Un tricoptère, pourquoi ?

- 6 contrôles indépendants : translations possibles.
- Moins de moteurs ;

Travaux similaires

Décrit entre autres dans :

- [2] S. Salazar-Cruz, F. Kendoul, R. Lozano, and I. Fantoni, "Real-time stabilization of a small three-rotor aircraft," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 2, pp. 783–794, 2008
- [3] J. Escareño, A. Sanchez, O. Garcia, and R. Lozano, "Triple tilting rotor mini-UAV: modeling and embedded control of the attitude," in *American Control Conference, 2008*, 2008, pp. 3476–3481
- [4] M. K. Mohamed and A. Lanzon, "Design and control of novel tri-rotor UAV," in *Control (CONTROL), 2012 UKACC International Conference on*, 2012, pp. 304–309

Modèle

Système soumis à ;

- poussée des rotors ;

Modèle

Système soumis à ;

- poussée des rotors ;
- poids ;

Modèle

Système soumis à ;

- poussée des rotors ;
- poids ;
- couple aérodynamique des rotors ;

Modèle

Système soumis à :

- poussée des rotors ;
- poids ;
- couple aérodynamique des rotors ;
- couple dû à la poussée.

Équations d'Euler Newton

$$
\begin{aligned}
M\left(\dot{\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\
J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\
J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho
\end{aligned}
$$

Avec :

$$
\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_3} \end{pmatrix}
$$

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, s_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, s_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, s_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, c_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, c_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, c_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, \mathsf{s}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathsf{s}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathsf{s}_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, \mathsf{c}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathsf{c}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathsf{c}_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2\, s_{\alpha_1} \\ \omega_2^2\, s_{\alpha_2} \\ \omega_3^2\, s_{\alpha_3} \\ \omega_1^2\, c_{\alpha_1} \\ \omega_2^2\, c_{\alpha_2} \\ \omega_3^2\, c_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;
- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}$: vitesse du drone dans $\mathcal{B}$;

Équations d'Euler Newton

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;
- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}$: vitesse du drone dans $\mathcal{B}$;
- $\boldsymbol{\Omega}$ vitesse angulaire du drone par rapport à $\mathcal{I}$;

Équations d'Euler Newton

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, s_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, s_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, s_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, c_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, c_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, c_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;
- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}$: vitesse du drone dans $\mathcal{B}$;
- $\boldsymbol{\Omega}$ vitesse angulaire du drone par rapport à $\mathcal{I}$;
- k_F : coef. de poussée aérodynamique ;

$$\begin{array}{rcl} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) & = & -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} & = & k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{array}$$

Avec :

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2\, \mathrm{s}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2\, \mathrm{s}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2\, \mathrm{s}_{\alpha_3} \\ \omega_1^2\, \mathrm{c}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2\, \mathrm{c}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2\, \mathrm{c}_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;
- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}$: vitesse du drone dans $\mathcal{B}$;
- $\boldsymbol{\Omega}$ vitesse angulaire du drone par rapport à $\mathcal{I}$;
- k_F : coef. de poussée aérodynamique ;
- k_M : coef. de couple aérodynamique ;

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

Avec :

$$\rho = \begin{pmatrix} \omega_1^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{s}_{\alpha_3} \\ \omega_1^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_1} \\ \omega_2^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_2} \\ \omega_3^2 \, \mathrm{c}_{\alpha_3} \end{pmatrix}$$

- $\mathcal{I}$: référentiel inertiel ;
- $\mathcal{B}$: référentiel lié au drone ;
- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}$: vitesse du drone dans $\mathcal{B}$;
- $\boldsymbol{\Omega}$ vitesse angulaire du drone par rapport à $\mathcal{I}$;
- k_F : coef. de poussée aérodynamique ;
- k_M : coef. de couple aérodynamique ;
- J : matrice d'inertie du drone.

Équations d'Euler Newton

$$\begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \end{pmatrix} = \Gamma + \Delta\rho$$

Équations d'Euler Newton

$$\begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \end{pmatrix} = \Gamma + \Delta\rho$$

Avec : $\det \Delta \neq 0$

Équations d'Euler Newton

$$\begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \end{pmatrix} = \Gamma + \Delta\rho$$

Et donc :

$$\rho = \Delta^{-1}\left(\begin{pmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} \\ \dot{\boldsymbol{\Omega}} \end{pmatrix} - \Gamma\right)$$

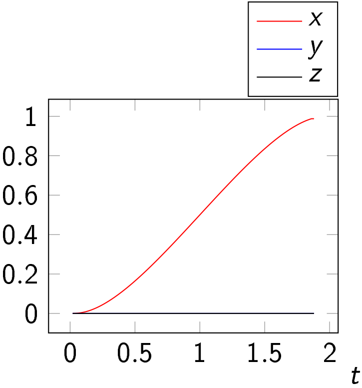


Figure : Position.

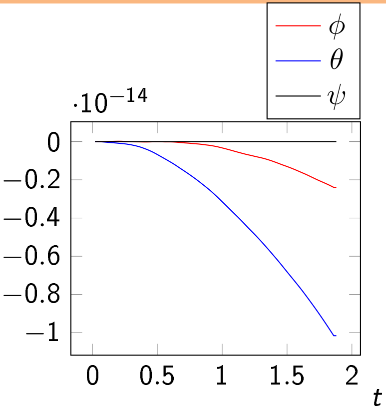


Figure : Orientation.

Simulation : Test de translation

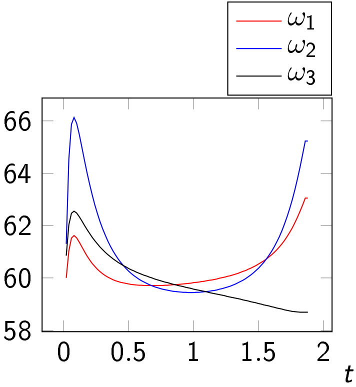


Figure : Vitesse de rotation des rotors.

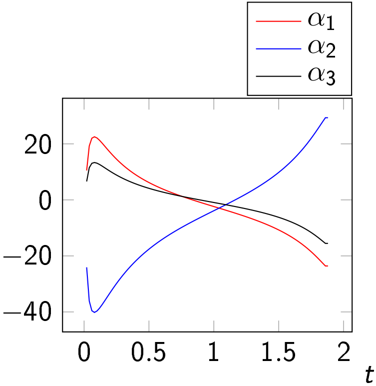


Figure : Inclinaison des rotors.

Sommaire

La charge est :

- ponctuelle ;

Modèle

La charge est :

- ponctuelle ;
- au bout d'un câble sans masse ;

La charge est :

- ponctuelle ;
- au bout d'un câble sans masse ;
- fixé en le centre de masse du drone.

Équations d'Euler-Newton :

$$
\begin{aligned}
M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - TR_{\mathcal{P}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} \\
J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho
\end{aligned}
$$

Équations d'Euler-Newton :

$$\begin{aligned} M\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{B}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - TR_{\mathcal{P}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} \\ J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho \end{aligned}$$

- $\mathcal{P}$: référentiel lié à la charge ;

$$
\begin{aligned}
M\left(\dot{\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}} + S(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{v}^{\mathcal{B}}\right) &= -k_F \boldsymbol{H}_f \rho + MgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - TR_{\mathcal{P}}^{\mathcal{B}} \boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} \\
J\dot{\boldsymbol{\Omega}} + S(\boldsymbol{\Omega})J\boldsymbol{\Omega} &= k_F L \boldsymbol{H}_t \rho - k_M \boldsymbol{H}_d \rho
\end{aligned}
$$

- $\mathcal{P}$: référentiel lié à la charge ;
- T : tension du câble.

Évaluation de la tension du câble :

$$m\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}} + S(\boldsymbol{\Omega}')\boldsymbol{v}^{\mathcal{P}}\right) = T\boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} + mgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}}$$

Évaluation de la tension du câble :

$$m\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}} + S(\boldsymbol{\Omega}')\boldsymbol{v}^{\mathcal{P}}\right) = T\boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} + mgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}}$$

- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{P}}$: vitesse de la charge dans $\mathcal{P}$;

Évaluation de la tension du câble :

$$m\left(\dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}} + S(\boldsymbol{\Omega}')\boldsymbol{v}^{\mathcal{P}}\right) = T\boldsymbol{z}_{\mathcal{P}} + mgR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}}$$

- $\boldsymbol{v}^{\mathcal{P}}$: vitesse de la charge dans $\mathcal{P}$;
- $\boldsymbol{\Omega}'$ vitesse angulaire de la charge par rapport à $\mathcal{P}$;

Dynamique angulaire du pendule :

Newton-Euler appliqué :

- au système câble+charge :

Dynamique angulaire du pendule :

Newton-Euler appliqué :

- au système câble+charge :
- en la rotule.

Newton-Euler appliqué :

- au système câble+charge :
- en la rotule.

Seul couple appliqué : poids de la charge

Dynamique angulaire du pendule :

$$J'\dot{\boldsymbol{\Omega}}' + S(\boldsymbol{\Omega}')J'\boldsymbol{\Omega}' = mlS(\boldsymbol{z}_{\mathcal{P}})\left(gR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}}\right)$$

$$J'\dot{\boldsymbol{\Omega}}' + S(\boldsymbol{\Omega}')J'\boldsymbol{\Omega}' = mlS(z_{\mathcal{P}})\left(gR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}}\right)$$

- J' matrice d'inertie du système câble+charge ;

Dynamique angulaire du pendule :

$$J'\dot{\boldsymbol{\Omega}}' + S(\boldsymbol{\Omega}')J'\boldsymbol{\Omega}' = mlS(\boldsymbol{z}_{\mathcal{P}})\left(gR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\boldsymbol{z}_{\mathcal{I}} - \dot{\boldsymbol{v}}^{\mathcal{P}}\right)$$

- J' matrice d'inertie du système câble+charge ;
- $\boldsymbol{\Omega}'$ vitesse angulaire de la charge par rapport à $\mathcal{P}$;

Dynamique angulaire du pendule :

$$J'\dot{\mathbf{\Omega}}' + S(\mathbf{\Omega}')J'\mathbf{\Omega}' = mlS(\mathbf{z}_{\mathcal{P}})\left(gR_{\mathcal{I}}^{\mathcal{P}}\mathbf{z}_{\mathcal{I}} - \dot{\mathbf{v}}^{\mathcal{P}}\right)$$

- J' matrice d'inertie du système câble+charge ;
- $\mathbf{\Omega}'$ vitesse angulaire de la charge par rapport à $\mathcal{P}$;
- $\mathbf{v}^{\mathcal{P}}$: vitesse de la charge dans $\mathcal{P}$;

Sorties plates :

Platitude du système

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;

Platitude du système

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;

Platitude du système

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;
- ψ : lacet du drone.

Platitude du système

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;
- ψ : lacet du drone.

En effet :

- dynamique de la charge par rapport au drone grâce à α, β ;

Platitude du système

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;
- ψ : lacet du drone.

En effet :

- dynamique de la charge par rapport au drone grâce à α, β ;
- la tension par le PFD appliqué à la charge ;

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;
- ψ : lacet du drone.

En effet :

- dynamique de la charge par rapport au drone grâce à α, β ;
- la tension par le PFD appliqué à la charge ;
- La position du drone par le PFD appliqué au drone+géométrie.

Sorties plates :

- $\boldsymbol{p}$: position de la charge ;
- α, β : orientation du pendule par rapport au drone ;
- ψ : lacet du drone.

En effet :

- dynamique de la charge par rapport au drone grâce à α, β ;
- la tension par le PFD appliqué à la charge ;
- La position du drone par le PFD appliqué au drone+géométrie.
- ϕ, θ grâce à ψ.

- E. Servais, B. d'Andréa Novel, and H. Mounier, "Motion Planning for Multi-Agent Systems Using Gevrey Trajectories Based on Burgers' Viscous Equation," in *19th IFAC World Congress, Cap Town*.
- S. Salazar-Cruz, F. Kendoul, R. Lozano, and I. Fantoni, "Real-time stabilization of a small three-rotor aircraft," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 2, pp. 783–794, 2008.
- J. Escareño, A. Sanchez, O. Garcia, and R. Lozano, "Triple tilting rotor mini-UAV : modeling and embedded control of the attitude," in *American Control Conference, 2008*, 2008, pp. 3476–3481.
- M. K. Mohamed and A. Lanzon, "Design and control of novel tri-rotor UAV," in *Control (CONTROL), 2012 UKACC International Conference on*, 2012, pp. 304–309.