LYCÉE LA MARTINIÈRE MONPLAISIR LYON

SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR

CLASSE PRÉPARATOIRE M.P.S.I.

ANNÉE 2020 - 2021

C4 : MODÉLISATION CINÉMATIQUE DES SYSTÈMES COMPOSÉS DE CHAINES DE SOLIDES

C4-4 - Cinématique du solide

5 Janvier 2021

Table des matières

Compétences

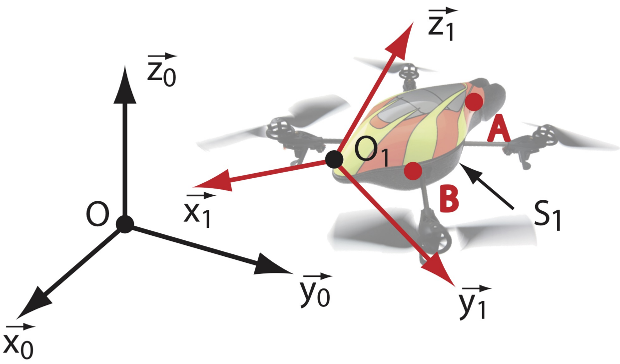
- **Analyser**; Caractériser des écarts : Grandeurs utilisées : unités du système international; homogénéité des grandeurs
- **Modéliser**; Proposer un modèle de connaissance et de comportement : Modélisation plane

I. Champ cinématique des solides

1 Torseur cinématique

Dans cette partie nous considérons que les solides sont indéformables. Le repère R_1 est attaché au solide S_1 (corps du drone ici), ainsi on note :

$$\overrightarrow{\Omega}(R_1/R_0)=\overrightarrow{\Omega}(S_1/R_0).$$



Considérons deux points **A et B appartenant au solide** S_1 attachés au repère $R_1\left(O_1,\overrightarrow{x_1},\overrightarrow{y_1},\overrightarrow{z_1}\right)$. D'après la définition des solides indéformables vue dans le premier chapitre :

$$\left[\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right]_{R_1}=\overrightarrow{0}.$$

En écrivant la dérivée temporelle du vecteur $\overrightarrow{AB}$ par rapport au repère R_0 avec la formule de dérivation vectorielle, on obtient :

$$\left[\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right]_{R_0}=\left[\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right]_{R_1}+\overrightarrow{\Omega}(S_1/R_0)\wedge\overrightarrow{AB}.$$

On peut également écrire :

$$\left[\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt}\right]_{R_0}=\left[\frac{d\overrightarrow{OB}}{dt}\right]_{R_0}-\left[\frac{d\overrightarrow{OA}}{dt}\right]_{R_0}=\overrightarrow{V}(B/R_0)-\overrightarrow{V}(A/R_0)$$

Définition 1 : *Changement de point*

- On obtient alors **la relation fondamentale de changement de point pour le champ cinématique** pour deux points A et B appartenant à un solide quelconque S :

$$\overrightarrow{V}(B/R_0)=\overrightarrow{V}(A/R_0)+\overrightarrow{\Omega}(S/R_0)\wedge\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{V}(A/R_0)+\overrightarrow{BA}\wedge\overrightarrow{\Omega}(S/R_0).$$

- On peut étendre cette formule à **deux points quelconques** A **et** B (n'appartenant pas forcément à S) avec l'utilisation des vitesses d'entrainement :

$$\boxed{\overrightarrow{V}(B\in S/R_0)=\overrightarrow{V}(A\in S/R_0)+\overrightarrow{BA}\wedge\overrightarrow{\Omega}(S/R_0).} \quad (1)$$

- *On peut parfois appeler cette relation, **la formule de Varignon**.*

Propriété 1 :

On remarque alors que les vecteurs vitesses des points d'un solide indéformable vérifient la relation de changement de point du moment d'un torseur. Nous pouvons alors définir le **torseur cinématiques**.

Définition 2 : *Torseur cinématique*

On définit le torseur cinématique du mouvement d'un solide indéformable S par rapport à un repère R_0, le torseur qui a pour résultante, le vecteur de rotation instantané $\overrightarrow{\Omega}(S/R_0)$ et pour moment la vitesse en un point donné A, dans le mouvement de S par rapport à R_0, $\overrightarrow{V}([\in A/])SR_0$. On le note alors :

$$\boxed{\left\{\mathscr{V}_{(S/R_0)}\right\} = \left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{\Omega_{(S/R_0)}} \\ \overrightarrow{V}([\in A/])SR_0 = \overrightarrow{V}_A(S/R_0) \end{array} \right\}_A} \tag{2}$$

Définition 3 : *Torseur*

Un torseur est un outil mathématique qui présente deux composantes vectorielles :

- Une résultante qui est **indépendante** du point où on l'exprime et que l'on note $\overrightarrow{R} = \overrightarrow{\Omega_{(S/R_0)}}$.
- Un moment qui **dépend du point** où on l'exprime par la **formule fondamental de changement de point** et que l'on note $\overrightarrow{M}_A(\overrightarrow{R}) = \overrightarrow{V}([\in A/])SR_0 = \overrightarrow{V}_A(S/R_0)$.

Remarque 1 :

Le point A est lié au solide S. Deux cas peuvent se présenter.

- Lorsque le point appartient physiquement au solide (S), il est lié à tout instant à ce solide. On peut alors calculer sa vitesse avec le vecteur vitesse ou par dérivation vectorielle. On parlera alors de **point matériel**.
- Lorsque le point considéré est lié uniquement au solide à l'instant t où on calcule son vecteur vitesse, on ne peut calculer sa vitesse qu'en utilisant la loi de composition des vitesses. On parlera alors de **point géométrique**.

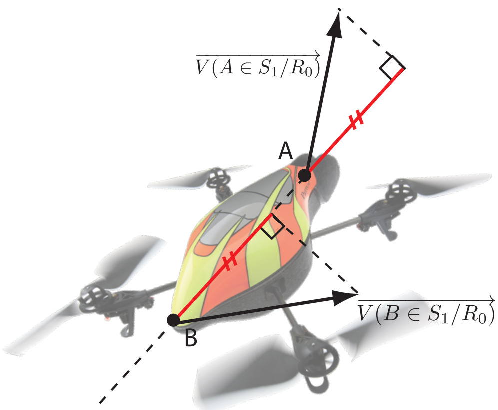
2 Propriétés

a) Equiprojectivité

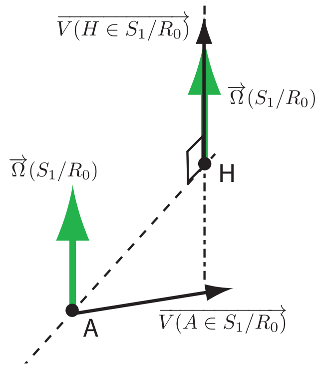
Définition 4 : *Equiprojectivité*

Un champ de vitesse est **équiprojectif**, c'est à dire qu'il vérifie pour tout couple de point (A, B) dans le mouvement d'un solide S_1 par rapport à R_0 la relation suivante :

$$\boxed{\overrightarrow{V}([\in A/])S_1R_0 \cdot \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{V}([\in B/])S_1R_0 \cdot \overrightarrow{AB}} \tag{3}$$



b) Axe central



Définition 5 : ***Axe central***

- Un **point central** d'un torseur est un point où le moment résultant a même direction que la résultante générale.
- L'**axe central** d'un torseur est la droite constituée par l'ensemble des points centraux. Il a même direction que la résultante du torseur. L'axe central n'existe que si la résultante du torseur n'est pas nulle.

Supposons un torseur défini en un point A du mouvement de S_1/R_0 :

$$\left\{\mathscr{V}_{(S_1/R_0)}\right\} = {}_A\left\{ \begin{array}{c} \overrightarrow{\Omega_{(S_1/R_0)}} \\ \overrightarrow{V}([\in A/])S_1 R_0 \end{array} \right\}$$

La position de la projection du point A sur l'axe central (que l'on notera H) est obtenu par la relation suivante :

$$\boxed{\overrightarrow{AH} = \frac{\overrightarrow{\Omega_{(S_1/R_0)}} \wedge \overrightarrow{V}([\in A/])S_1 R_0}{\overrightarrow{\Omega_{(S_1/R_0)}}^2}} \quad (4)$$

3 Composition des champs cinématiques

Propriété 2 : ***Composition des champs cinématiques***

On peut décomposer un champ cinématique à l'aide des torseurs en effectuant une relation de Chasles par des solides successifs. Soit S_1, S_2, $\cdots$ S_n un ensemble de solides indéformables :

$$\boxed{\left\{\mathscr{V}_{(S_n/S_0)}\right\} = \left\{\mathscr{V}_{(S_n/S_{n-1})}\right\} + \left\{\mathscr{V}_{(S_{n-1}/S_{n-2})}\right\} + \cdots \left\{\mathscr{V}_{(S_1/S_0)}\right\}} \quad (5)$$

Il en découle une décomposition en :

- Vecteur rotation instantané :

$$\boxed{\overrightarrow{\Omega}(S_n/S_0) = \overrightarrow{\Omega}(S_n/S_{n-1}) + \overrightarrow{\Omega}(S_{n-1}/S_{n-2}) + \cdots \overrightarrow{\Omega}(S_1/S_0)} \quad (6)$$

- Vecteur vitesse en un même point quelconque A :

$$\boxed{\overrightarrow{V}(A \in S_n/S_0) = \overrightarrow{V}(A \in S_n/S_{n-1}) + \overrightarrow{V}(A \in S_{n-1}/S_{n-2}) + \cdots \overrightarrow{V}(A \in S_1/S_0)} \quad (7)$$

4 Champ de vecteur accélération des points d'un solide

Définition 6 : ***Champ d'accélération***

Le relation de changement de point entre A et B pour un champ d'accélération d'un solide S_1 par rapport à un repère R_0 est donnée par :

$$\overrightarrow{a}(B/R_0) = \overrightarrow{a}(A/R_0) + \left[\frac{d}{dt}\overrightarrow{\Omega}(S_1/R_0)\right]_{R_0} \wedge \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{\Omega}(S_1/R_0) \wedge \left(\overrightarrow{\Omega}(S_1/R_0) \wedge \overrightarrow{AB}\right).$$

Attention :

Un champ d'accélération n'est pas un champ de moment, c'est à dire qu'il ne vérifie pas les propriétés d'équiprojectivité et il ne peut pas être décrit par un torseur.

II. Mouvements particuliers des solides

1 Mouvement de translation

a) Définition

Définition 7 : *Mouvement de translation*

Un solide S_1 est en mouvement de **translation** par rapport à R_0 si l'ensemble des points de S_1 ont la même vitesse à l'instant t par rapport à R_0.
Le vecteur de rotation instantané associé à ce torseur est nul : $\overrightarrow{\Omega(S_1/R_0)} = \overrightarrow{0}$. Il s'agit donc d'un **torseur couple** qui est indépendant du point où on l'exprime :

$$\boxed{\left\{\mathscr{V}_{(S_1/R_0)}\right\} = {}_A\left\{\begin{array}{c}\overrightarrow{0}\\ \overrightarrow{V}([\in A/])S_1R_0\end{array}\right\} = {}_B\left\{\begin{array}{c}\overrightarrow{0}\\ \overrightarrow{V}([\in B/])S_1R_0\end{array}\right\}} \quad (8)$$

Parmi les mouvements de translation, on peut en retenir deux particuliers :

b) Mouvement de translation rectiligne

Définition 8 : *translation rectiligne*

Un mouvement de translation de S_1 par rapport à R_0 est dit de **translation rectiligne** si la trajectoire de tous les points de S_1 par rapport à R_0 est une **droite**. Dans ce cas $\overrightarrow{V}([\in A/])S_1R_0$ a pour direction la trajectoire du point A.

c) Mouvement de translation circulaire

Définition 9 : *Mouvement de translation circulaire*

Un mouvement de S_1 par rapport à R_0 est dit de **translation circulaire** si la trajectoire de tous les points de S_1 sont des **cercles**.

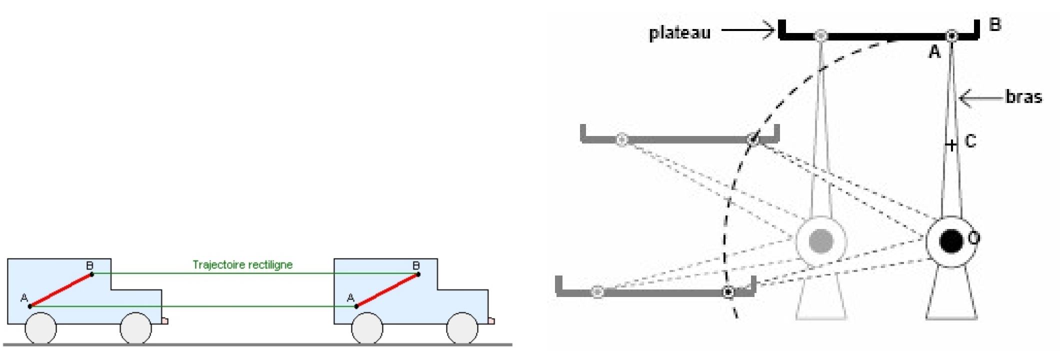


FIGURE 1 – Exemple de translation rectiligne et circulaire.

2 Mouvement de rotation

Définition 10 : *Mouvement de rotation*

Un solide S_1 est en **mouvement de rotation** par rapport à R_0 autour d'un axe $\left(A, \overrightarrow{u}\right)$ si tous les points appartenant à l'axe $\left(A, \overrightarrow{u}\right)$ ont une vitesse nulle par rapport à R_0. Le vecteur de rotation instantané ($\overrightarrow{\Omega}(S_1/S_0)$) est alors colinéaire à la direction $\overrightarrow{u}$:

$$\overrightarrow{\Omega}(S_1/S_0) \wedge \overrightarrow{u} = \overrightarrow{0}$$

$$\boxed{\left\{\mathscr{V}_{(S_1/R_0)}\right\} = \underset{A}{\left\{\begin{array}{c} \overrightarrow{\Omega}(S_1/S_0) \\ \overrightarrow{0} \end{array}\right\}}} \tag{9}$$

$$\forall A \in \overrightarrow{u}.$$

Ce torseur est alors "**un glisseur**" car il existe des points pour lesquels le moment du torseur cinématique est nul. Ces points appartiennent à l'axe de rotation qui est **l'axe central du torseur cinématique associé**.

3 Mouvement de translation/rotation hélicoïdale

Définition 11 : *Mouvement de translation/rotation hélicoïdale*

- Un mouvement de **translation/rotation** hélicoïdale est la superposition entre un mouvement de rotation autour d'un axe $\left(A, \overrightarrow{u}\right)$ et de translation suivant la direction $\overrightarrow{u}$.
- Ces deux mouvement sont liés par le paramètre p qui représente le **pas hélicoïdal** et s'exprime en $m.rad^{-1}$.
- Le torseur cinématique associé à ce mouvement pour un solide S_1 par rapport à R_0 est donné par :

$$\boxed{\left\{\mathscr{V}_{(S_1/R_0)}\right\} = \underset{A}{\left\{\begin{array}{c} \overrightarrow{\Omega}(S_1/S_0) = \Omega \cdot \overrightarrow{u} \\ \overrightarrow{V}([\in A/])S_1 R_0 = p\Omega \cdot \overrightarrow{u} \end{array}\right\}}} \tag{10}$$

4 Mouvements plan

a) Définition

Soit un solide S_1, de repère lié R_1 , en mouvement dans un repère R_0 .

Définition 12 : *Mouvement plan*

On dit que S_1 a **un mouvement plan** dans R_0 si chaque point $M \in S_1$ se déplace parallèlement à un plan P_0 lié à R_0 . Autrement dit, si $\overrightarrow{n}$ est la normale à P_0, alors :

$$\overrightarrow{V}([\in M/])S_1 R_0 \cdot \overrightarrow{n} = 0 \qquad \forall M \in S_1$$

Remarque 2 :
Dans le cas d'un mouvement plan (par exemple dans le plan $\left(O,\overrightarrow{x_0},\overrightarrow{y_0}\right)$, le torseur cinématique de S_1 par rapport à R_0 se ramène à :

$$\left\{\mathscr{V}_{(S_1/R_0)}\right\} = \underset{\forall M}{\left\{\begin{array}{cc} 0 & V_x \\ 0 & V_y \\ \omega_z & 0 \end{array}\right\}}_{R_0}$$

On remarquera ainsi que $\overrightarrow{\Omega_{(S_1/R_0)}} \perp \overrightarrow{V}([\in M/])S_1 R_0$, et donc que ce torseur est un glisseur.

Exemple 1 : ***Forme des torseurs pour des mouvements plans***

- cas d'un mouvement dans le plan $\left(O,\overrightarrow{x_0},\overrightarrow{y_0}\right)$, le torseur cinématique de S_1 par rapport à R_0 est donné par :
- cas d'un mouvement dans le plan $\left(O,\overrightarrow{z_0},\overrightarrow{x_0}\right)$, le torseur cinématique de S_1 par rapport à R_0 est donné par :
- cas d'un mouvement dans le plan $\left(O,\overrightarrow{y_0},\overrightarrow{z_0}\right)$, le torseur cinématique de S_1 par rapport à R_0 est donné par :

b) Centre instantané de rotation (C.I.R.)

Définition 13 : ***Centre instantané de rotation (C.I.R.)***
On appelle "**centre instantané de rotation**" (noté familièrement "**C.I.R.**") le point d'intersection entre l'axe central (Δ) et le plan du mouvement.
On désignera par "I_{10}" le CIR du mouvement de S_1 par rapport à R_0 .

Remarque 3 :
Pendant un instant Δt infiniment bref, le centre instantané de rotation représente le point autour duquel S_1 a un mouvement de rotation. Cependant, à l'instant suivant, il peut avoir changé de position.

Propriétés 3 :

- Soit S_1, un solide en mouvement dans un repère R_0 , et ayant pour CIR "I_{10}". Alors, pour tout $P \in S_1$, on a (fig.2) :

$$\overrightarrow{V}([\in P/])S_1R_0 \cdot \overrightarrow{PI_{10}} = 0 \qquad \Leftrightarrow \qquad \overrightarrow{V}([\in P/])S_1R_0 \perp \overrightarrow{PI_{10}} \tag{11}$$

- La norme des vecteurs vitesse est proportionnelle à la distance au CIR.
- On en déduit que la vitesse sur le CIR est nulle.

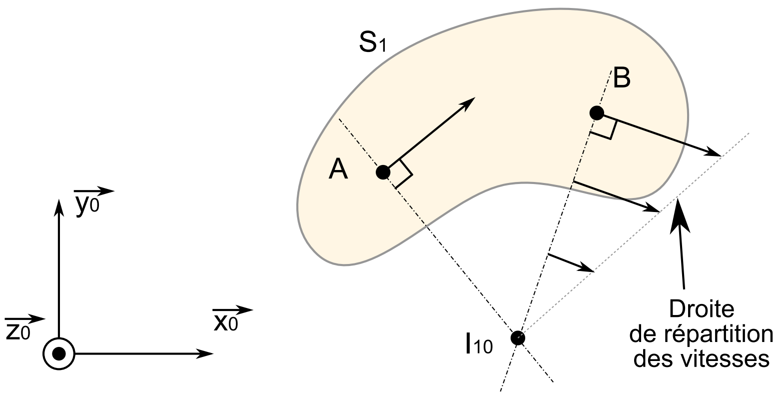


FIGURE 2 – Orthogonalité entre les vitesses et le "rayon au CIR".

c) Cas des mouvements de translation

Lorsque le mouvement relatif des deux solides est un translation, le CIR **n'existe pas**. Cependant, on peut considérer qu'il est comme rejeté à l'infini, perpendiculairement à la direction de la translation (fig.3).

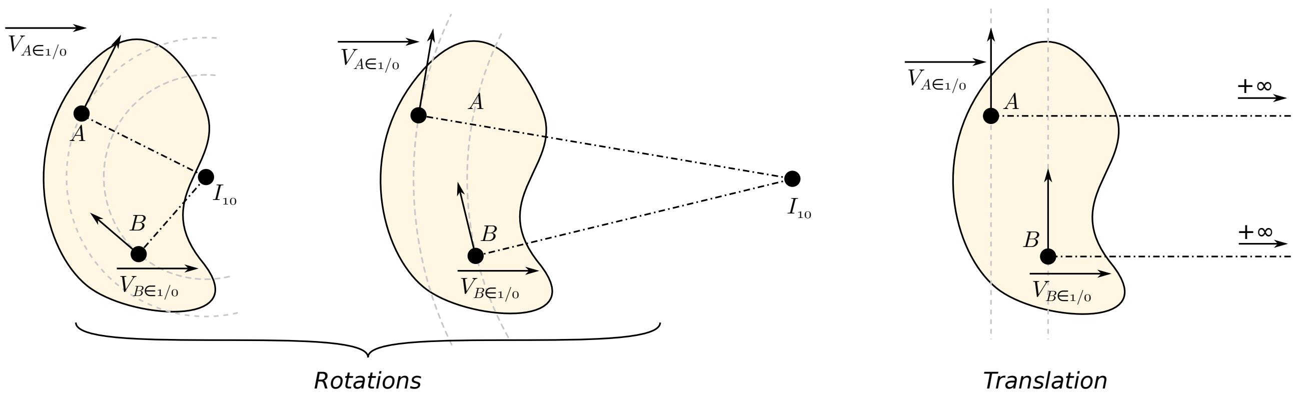


FIGURE 3 – CIR en translation.