

UR Log Viewer - Analyse du profil trapézoïdal de la vitesse d'un robot UR

Jean-Louis Boimond
University of Angers

Ce document met en évidence le profil trapézoïdal de la vitesse au niveau des articulations d'un robot Universal Robots (UR), dans le cas présent un robot UR3e, qui apparaît lorsque le mouvement du bras du robot est calculé dans l'*espace articulaire* ; l'intérêt d'un tel profil étant de minimiser le temps de déplacement du bras. La position, la vitesse et l'accélération des articulations durant un mouvement sont mesurées à l'aide du logiciel *UR Log Viewer*, installé sur un PC connecté au contrôleur du robot, voir §1. Dans un premier temps, pour faciliter la compréhension, le mouvement du bras du robot, programmé à l'aide de *Polyscope* (voir §2.a), consiste à mettre en mouvement une seule articulation, à savoir l'articulation no. 3¹ (appelée coude, 'elbow' en anglais), ce qui revient à effectuer un mouvement de rotation autour de cette articulation, voir §2, §3.1. La mise en mouvement conjointe des six articulations du bras du robot est abordée au §3.2 et nécessitera une synchronisation du mouvement des articulations afin notamment que toutes les articulations atteignent leur valeur angulaire finale en même temps.

Table des matières

1 Logiciel UR Log Viewer	1
1.1 Présentation de UR Log Viewer.....	1
1.2 Installation de UR Log Viewer sur un PC	2
1.3 Connexion entre le PC et le robot	2
1.3.a Identification de l'adresse IP du robot	2
1.3.b Configuration de l'adresse IP du PC compatible avec celle du robot.....	2
1.3.c Câblage entre le PC et le robot.....	3
2 Programmation du mouvement à l'aide de Polyscope, prise de mesures	3
2.a Programmation du mouvement.....	3
2.b Prise de mesures durant le mouvement	5
3 Analyse des mesures	6
3.1 Validation des trajectoires de la position, de la vitesse et de l'accélération de l'articulation no. 3.....	6
3.2 Synchronisation lors du déplacement simultané de plusieurs articulations	8

1 Logiciel UR Log Viewer

1.1 Présentation de UR Log Viewer

UR Log Viewer est un logiciel Windows disponible sur le site web du fabricant de robots. Il permet aux utilisateurs de visualiser/analyser/enregistrer, à l'aide d'un PC connecté au contrôleur du

¹ Il s'agit bien de la troisième articulation, la première étant la *base* ('base' en anglais), la seconde étant l'*épaule* ('shoulder' en anglais).

robot, certaines données contenues dans différents fichiers générés automatiquement lors de l'exécution d'une tâche effectuée au sein des contrôleurs des robots UR. Le but est de déboguer/améliorer une application en cours de développement en comprenant mieux le comportement du robot. Dans notre cas, nous allons simplement utiliser ce logiciel afin de visualiser les trajectoires de la position, de la vitesse et de l'accélération de certaines articulations effectuées lors du mouvement du bras du robot.

1.2 Installation de UR Log Viewer sur un PC

UR Log Viewer est téléchargeable [<ici>](https://www.universal-robots.com/) (il est également accessible en tapant 'log viewer' dans le champ de recherche d'une fenêtre qui s'affiche en sélectionnant l'onglet **Training&Support>Resources&Downloads** sur le site Web de Universal Robots : <https://www.universal-robots.com/>).

N.B. : Il n'est pas nécessaire de désactiver le pare-feu de Windows pour utiliser UR Log Viewer, cependant vous devrez probablement indiquer au pare-feu que vous autorisez l'accès du logiciel au trafic réseau lors de l'utilisation du logiciel pour la première fois.²

1.3 Connexion entre le PC et le robot

La connexion entre le PC et le contrôleur du robot nécessite de connaître l'adresse IP du robot afin de configurer une adresse IP du PC compatible avec celle du robot.

1.3.a Identification de l'adresse IP du robot

Cliquer sur l'icône  (située en haut à droite du *Teach Pendant* du robot), puis sélectionner **Réglages**, puis l'onglet **Système>Réseau**, ce qui donne accès aux informations suivantes, à savoir dans le cas du robot UR3e de l'école :

Adresse IP **statique** : 169.254.123.187,

Masque sous réseau : 255.255.255.0,

Passerelle par défaut : 0.0.0.0,

comme indiqué dans la figure qui suit.



Figure 1 : Adresse IP statique du robot.

1.3.b Configuration de l'adresse IP du PC compatible avec celle du robot

Pour configurer l'adresse IP du PC sous Windows 11, ouvrir le **Panneau de configuration** et suivre les étapes suivantes :

² L'interface Real-Time Data Exchange (RTDE) du contrôleur du robot est supposée être activée, ce qui est le cas par défaut durant l'exécution du contrôleur.

- Cliquer sur **Réseau et Internet>Centre Réseau et partage**,
- Cliquer sur **Modifier les paramètres de la carte**,
- Faire un **clic droit** sur la carte **Ethernet** sur laquelle le câble Ethernet sera branchée (dans le cas présent, la carte Ethernet 2) afin de cliquer sur **Propriétés**,
- Sélectionner dans la liste **Protocole Internet version 4 (TCP/IPv4)**, puis cliquer sur **Propriétés**,
- Cocher **Utiliser l'adresse IP suivante** (c'est-à-dire, une adresse statique, et non dynamique) afin de définir une adresse IP dans la même plage d'adresse que le robot, soit par exemple l'adresse 169.254.123.100, en respectant le masque de sous-réseau, soit 255.255.255.0, comme indiqué dans la figure suivante :

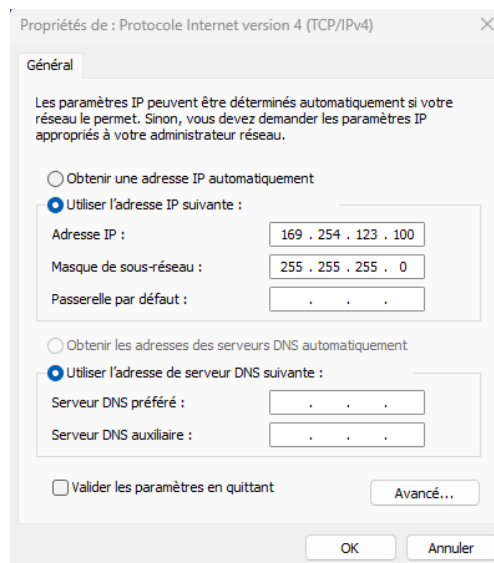


Figure 2 : Adresse IP statique du PC.

1.3.c Câblage entre le PC et le robot

Brancher un câble Ethernet entre le PC et le contrôleur du robot. Tester la connexion en exécutant un ping sur l'adresse IP du robot (dans notre cas : 169.254.123.187) dans l'invite de commande du PC.

2 Programmation du mouvement à l'aide de Polyscope, prise de mesures

2.a Programmation du mouvement

Comme mentionné dans l'introduction, le mouvement du bras du robot que nous allons étudier consiste simplement à effectuer une rotation de 0° vers 80° de l'articulation no. 3. Le mouvement résultant est représenté dans l'animation *html* accessible [<ici>](#).

Dans le programme, on définit un point de départ, noté **A**, et un point d'arrivée, noté **B**, tels que : l'articulation no. 3 est égale à 0° au point **A** et à 80° au point **B**, sachant que les valeurs

des autres articulations sont les mêmes pour les deux points³, à savoir : -90° pour les articulations no. 1 (base) et 2 (épaule, ‘shoulder’ en anglais), 0° pour les articulations no. 4, 5, 6. Le programme doit être tel que :

- Le mouvement pour déplacer le bras du robot du point **A** vers le point **B** soit calculé dans l’espace articulaire, en utilisant l’instruction **DéplacementA** (moveJ en anglais), sachant que le bras du robot doit être à l’arrêt à ces deux points ;
- La vitesse maximale, dite *de croisière*, soit fixée à $60^\circ/s$, l’accélération maximale souhaitée soit fixée à $80^\circ/s^2$. Notez que ces vitesse et accélération sont à distinguer des vitesse et accélération maximales (admissibles) des articulations du bras du robot⁴.

Réalisation 1 : Réaliser un programme permettant le mouvement du bras du robot du point **A** vers le point **B** à l’aide du logiciel Polyscope⁵. Vous noterez, comme cela est illustré dans les figures 3.a, 3.b, 3.c qui suivent, que :

- L’onglet **Programme** permet de créer un programme Polyscope à travers l’ajout de commandes disponibles dans la liste des commandes **De base**, on utilisera dans notre cas les commandes **Déplacement** et **PointPassage** ;
- La commande **Déplacement** contrôle le mouvement entre les points de passage définis sous la commande. Dans notre cas, on utilise deux points de passage, l’un intitulé **PointPassage_1** (plutôt que **A**), l’autre intitulé **PointPassage_2** (plutôt que **B**) définis ci-dessous. Trois indications sont données dans la fenêtre située à droite relativement à la commande **Déplacement** :
 - Le type de déplacement dans l’espace articulaire *via* **DéplacementA**,
 - La vitesse et l’accélération lors du déplacement du bras du robot entre ses deux points de passage dans les champs **Vitesse d’articulation** et **Accélération d’articulation** respectivement. C’est là que seront définies la vitesse de croisière et l’accélération maximale souhaitée,

voir la figure qui suit concernant le paramétrage de cette commande :

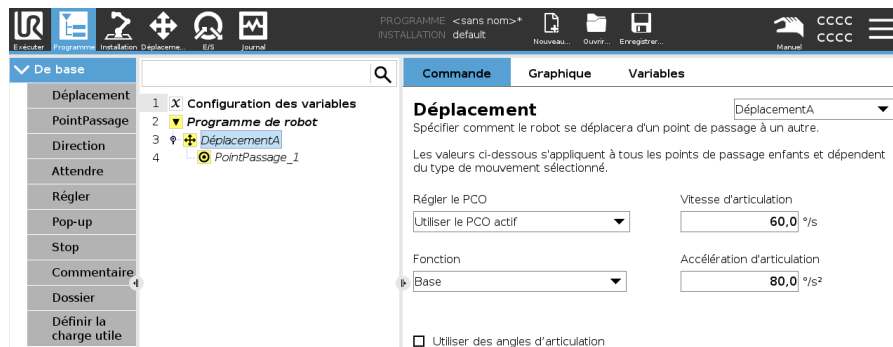


Figure 3.a : Définition de la commande **Déplacement**.

³ Il n’y a pas de mouvement d’une articulation entre les points **A** et **B** si les valeurs de l’articulation en ces points sont les mêmes, en effet, la valeur articulaire est constante durant le mouvement de **A** vers **B**.

⁴ Le niveau de sécurité des ‘Préréglages d’usine’ doit être suffisamment élevé pour permettre d’atteindre la vitesse de croisière. Dans notre cas, le niveau est égal à 3, ce qui permet une vitesse maximale des trois premières articulations de l’ordre de $190^\circ/s$ et des trois dernières de l’ordre de $370^\circ/s$.

⁵ Polyscope permet la mise en mouvement du bras du robot à partir de l’apprentissage d’une série de points acquis à l’aide du *Teach Pendant*. Consulter le manuel de l’utilisateur du robot UR3e en tapant ‘user manual UR3e’ dans le champ de recherche d’une fenêtre accessible à l’adresse : <https://www.universal-robots.com/support/>

- Vous noterez que le point **PointPassage_1** a été défini par défaut, le point **PointPassage_2** sera défini en utilisant la commande **PointPassage**. Pour ces deux points, on va indiquer que :

- Le bras du robot s'arrête au point (en cochant la case **Arrêter à ce point**) et la vitesse et l'accélération d'articulation sont celles définies dans la commande **Déplacement** précédente (en cochant la case **Utiliser les paramètres partagés**). Voir la figure qui suit relativement au point **PointPassage_1** :

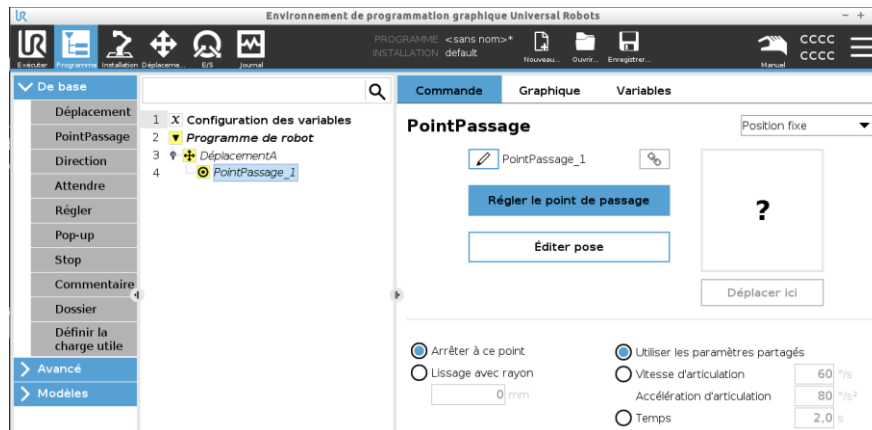


Figure 3.b : Paramétrage du point **PointPassage_1**.

- Les valeurs articulaires du point **PointPassage_1** sont définies en sélectionnant le bouton **Editer pose** (accessible dans l'onglet **Commande** qui apparaît par défaut) via les champs **Base**, **Epaule**, **Coude**, **Poignet 1**, **Poignet 2**, **Poignet 3**, voir la figure qui suit :

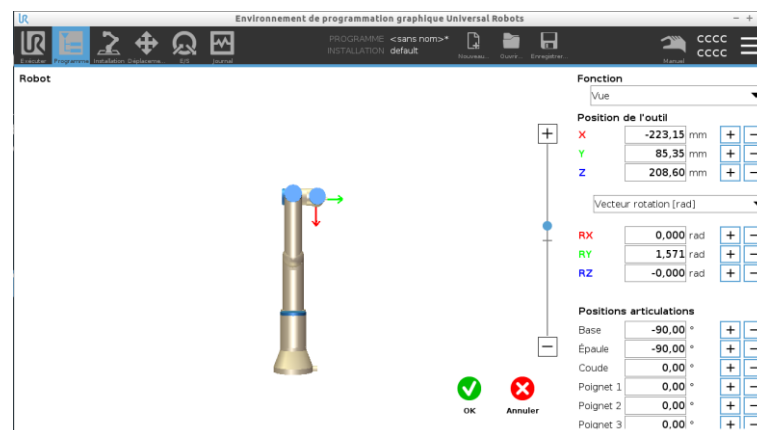


Figure 3.c : Définition des 6 valeurs articulaires du point **PointPassage_1**.

- La commande **Stop** ajoutée à la fin du programme permet d'arrêter son exécution (sans quoi le mouvement du bras du robot se répéterait).

2.b Prise de mesures durant le mouvement

Exécuter le logiciel UR Log Viewer. On effectue dans la fenêtre d'accueil les étapes décrites ci-dessous afin de mesurer et visualiser la position, la vitesse et l'accélération de l'articulation no. 3 durant le mouvement issu de la **Réalisation 1** :

- Sélectionner l'onglet **Record Data** afin de cocher les cases correspondant à **Joint Angle**, **Joint Velocity** et **Joint Acceleration** (si nécessaire décocher les autres cases). Noter que la fréquence de mesure est fixée à 500 *Hz* par défaut ;
- Indiquer l'IP du contrôleur du robot (à savoir 169.254.123.187) dans le champ **IP** (situé en haut au milieu de la fenêtre) ;
- Cliquer sur le bouton **Start** (situé en haut à droite de la fenêtre) pour démarrer la prise de mesures : en pratique, quelques secondes avant d'exécuter (à partir du *Teach Pendant*) le mouvement du bras du robot, c'est-à-dire avant que le bras quitte le point **A** ;
- Cliquer sur le bouton **Stop** pour arrêter la prise de mesures une fois que le bras s'est arrêté au point **B** ;
- Sélectionner l'onglet **Log Reader** afin de double-cliquer sur le fichier *Flightrecord* contenant les mesures prises précédemment. Cliquer sur **UR3** dans la fenêtre qui apparaît pour visualiser les courbes de position, vitesse et accélération des six articulations.

Réalisation 2 : Mesurer, à l'aide de UR Log Viewer, la position, la vitesse et l'accélération des articulations durant le mouvement correspondant au programme Polyscope réalisé dans la **Réalisation 1**. Visualiser celles correspondant à l'articulation no. 3 (le coude) afin d'effectuer leurs analyses ci-dessous.

3 Analyse des mesures

Le calcul du mouvement correspondant à l'instruction **DéplacementA** (**moveJ** en anglais), utilisée dans le programme réalisé dans la **Réalisation 1**, s'effectue dans l'espace articulaire et donne lieu à un profil trapézoïdal de la vitesse de l'articulation no. 3, ce qui minimise le temps de déplacement de l'articulation, ceci en tenant compte de la vitesse de croisière et de l'accélération maximale souhaitée.

3.1 Validation des trajectoires de la position, de la vitesse et de l'accélération de l'articulation no. 3.

Soient q la trajectoire de la position, $\dot{q}$ la trajectoire de la vitesse et $\ddot{q}$ la trajectoire de l'accélération de l'articulation no. 3. Ces trajectoires sont décrites dans la figure qui suit.

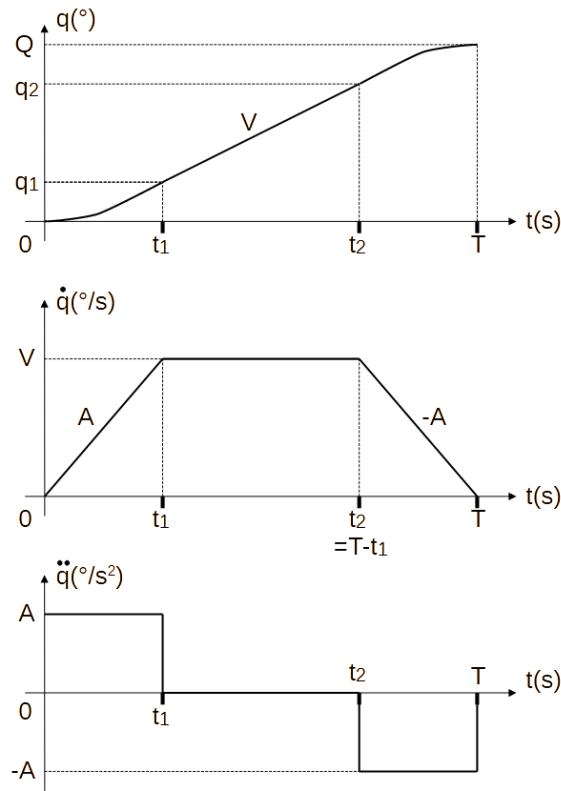


Figure 4 : Position (q), vitesse ($\dot{q}$) et accélération ($\ddot{q}$) de l'articulation no. 3.

La trajectoire en vitesse est dite *trapézoïdale*, sa forme en trapèze vient de sa constitution en trois segments :

- Le premier segment dont la pente est égale à l'accélération maximale souhaitée (A) de l'articulation durant une phase d'*accélération constante* (entre les instants 0 et t_1) ;
- Le second segment de pente nulle (du fait d'une accélération nulle) et dont la valeur est égale à la vitesse de croisière (V) de l'articulation durant une phase de croisière (entre les instants t_1 et t_2) ;
- Le troisième segment dont la pente est égale à la décélération maximale souhaitée ($-A$) de l'articulation durant une phase de *décélération constante* (entre les instants t_2 et T) sachant que la durée de ce segment est égale à celle du premier segment, autrement dit $t_2 = T - t_1$.

La trajectoire en position, résultant de l'intégration de la trajectoire en vitesse, est formée d'un segment de pente égale à V entre les instants t_1 et t_2 , connecté à deux segments paraboliques aux positions initiale (entre les instants 0 et t_1) et finale (entre les instants t_2 et T). Soit :

$$q(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}At^2 & \text{pour } 0 \leq t \leq t_1, \\ V(t - \frac{t_1}{2}) & \text{pour } t_1 < t \leq t_2 (= T - t_1), \\ Q - \frac{1}{2}A(t - T)^2 & \text{pour } t_2 < t \leq T. \end{cases}$$

On observe une symétrie de la trajectoire q par rapport au point $(T/2, Q/2)$.

La trajectoire en accélération, résultant de la dérivation de la trajectoire en vitesse, est formée d'un segment de valeur (constante) nulle entre les instants t_1 et t_2 , connecté à deux segments

de valeur (constante) égale à : A entre les instants 0 et t_1 , et $-A$ entre les instants t_2 et T . On observe une symétrie de la trajectoire par rapport au point $(T/2, 0)$.

N.B. : Les points **A** et **B** sont supposés être suffisamment distants l'un de l'autre pour permettre l'établissement d'une vitesse de croisière lors du mouvement de **A** vers **B** (ce qui est le cas si $t_2 > t_1$) et donc permettre l'apparition d'une trajectoire trapézoïdale de la vitesse de l'articulation no. 3. Si la distance entre les points **A** et **B** est trop petite, il en résulte une trajectoire (seulement) triangulaire en vitesse, dite *bang-bang*, du fait d'un manque de temps pour que l'articulation atteigne sa vitesse de croisière.

Calcul 3 : La vitesse de croisière V , l'accélération maximale souhaitée A et la valeur angulaire Q de l'articulation no. 3 au point **B** (la valeur angulaire au point **A** étant nulle pour simplifier les calculs) sont supposées connues. Exprimer, en fonction de V, A et Q , les valeurs t_1, q_1, t_2, q_2, T indiquées dans la figure précédente où :

- t_1 est l'instant où la vitesse $\dot{q}$ atteint sa vitesse de croisière V sachant que cette vitesse a été linéairement atteinte et que le bras du robot était à l'arrêt à l'instant 0,
- q_1 est la position atteinte à l'instant t_1 ,
- t_2 est l'instant où la vitesse $\dot{q}$ quitte sa vitesse de croisière V pour linéairement atteindre une vitesse nulle à l'instant T (ce qui donne lieu à un arrêt du bras du robot à l'instant T),
- q_2 est la position atteinte à l'instant t_2 ,
- T représente le temps mis par l'articulation pour atteindre le point **B** (le départ du mouvement du bras se produisant au point **A** à l'instant 0).

Réalisation 4 : Calculer à l'aide des formules (littérales) déterminées dans **Calcul 3** les valeurs numériques de t_1, q_1, t_2, q_2, T pour les valeurs V, A, Q considérées lors des mesures de la position, de la vitesse et de l'accélération de l'articulation no. 3 via UR Log Viewer. Comparer-les avec celles mesurées lors de la **Réalisation 2**. Quelles conclusions tirez-vous quant à la validité des formules littérales ?

3.2 Synchronisation lors du déplacement simultané de plusieurs articulations

Jusqu'à présent, on s'est focalisé sur la mise en mouvement d'une seule articulation (à savoir l'articulation no. 3), ce qui revient à étudier un simple mouvement de rotation de l'articulation. Considérons maintenant le cas où le déplacement du bras du robot d'un point **A** vers un point **B** nécessite le mouvement conjoint des six articulations. La méthode de calcul qui suit est fréquemment utilisée par les fabricants de robots. Le profil de la vitesse des articulations est toujours trapézoïdal, mais le calcul de ces profils doit également prendre en compte le fait que :

- Le mouvement des articulations soit synchronisé afin que toutes les articulations atteignent leur valeur angulaire finale en même temps (même valeur de T),
- Les temps d'accélération et de décélération soient les mêmes pour toutes les articulations (même valeur de t_1 , et donc également même valeur de t_2 puisque $t_2 = T - t_1$).

Le calcul se fait en plusieurs étapes, à savoir :

- Les trajectoires de chacune des six articulations sont calculées indépendamment les unes des autres. En déduire l'articulation, notée j par la suite, ayant la *trajectoire la plus*

lente pour atteindre le point **B**. Cette trajectoire sera celle utilisée pour contrôler l'articulation no. j ;

- La trajectoire de chacune des cinq autres articulations est *synchronisée* relativement à l'articulation j afin que son temps t_1 (instant où l'articulation atteint sa vitesse de croisière) soit égal au temps t_{1j} et que son temps T (durée mise par l'articulation pour atteindre le point **B**) soit égal au temps T_j . Considérons, par exemple, l'articulation no. k ($k \neq j$), il s'agit de calculer la vitesse v et l'accélération a permettant de définir la *trajectoire synchronisée*, notée ${}^S\dot{q}_k$. Soient : $\dot{q}_k$ la trajectoire à *synchroniser* représentée dans la figure 5.a ; $\dot{q}_j$ la trajectoire *la plus lente* et ${}^S\dot{q}_k$ la trajectoire *synchronisée* représentées dans la figure 5.b :

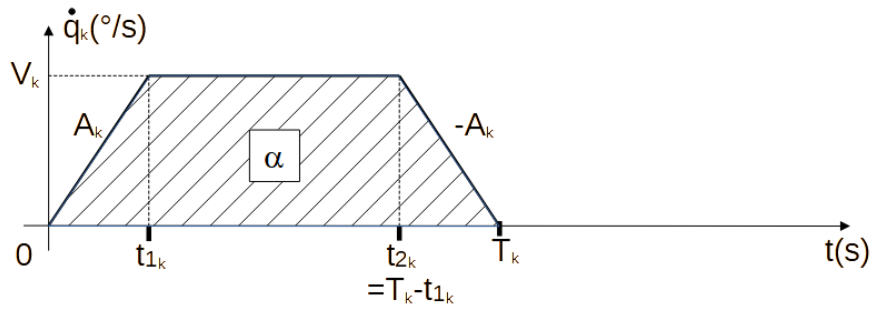


figure 5.a

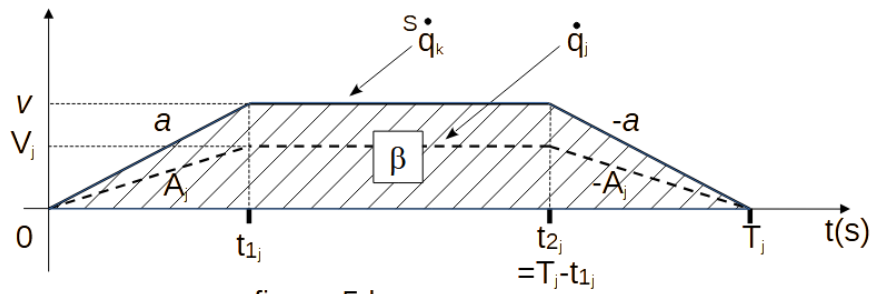


figure 5.b

Figure 5 : Trajectoires $\dot{q}_k$ (voir figure 5.a), $\dot{q}_j$ et ${}^S\dot{q}_k$ (voir figure 5.b).

Notons que l'aire α du trapèze relatif à $\dot{q}_k$, représentée dans la figure 5.a, est égale à la valeur angulaire Q_k parcourue par l'articulation no. k dans l'intervalle $[0, T_k]$, en effet, on a :

$$\alpha = \int_0^{T_k} \dot{q}_k(\tau) d\tau = q_k(T_k) = Q_k.$$

Par conséquence, la synchronisation de la trajectoire $\dot{q}_k$ relativement à la trajectoire $\dot{q}_j$ consiste à calculer la vitesse v et l'accélération a de la trajectoire *synchronisée* ${}^S\dot{q}_k$ en fonction de V_j, A_j, Q_j, Q_k (données extraites des articulation j et k supposées connues) afin que :

- Son temps pour atteindre la vitesse de croisière (${}^S t_{1k}$) soit égal au temps t_{1j} ,
- Son temps pour atteindre le point **B** (${}^S T_k$) soit égal au temps T_j ,
- L'aire de son trapèze, notée β dans la figure 5.b, qui correspond à la valeur angulaire parcourue par l'articulation dans l'intervalle $[0, T_k]$, soit égale à l'aire α .

Ainsi, on a :

$$\alpha = \frac{1}{2} A_k t_{1k}^2 + (T_k - 2t_{1k}) A_k t_{1k} + \frac{1}{2} A_k t_{1k}^2 = A_k t_{1k} (T_k - t_{1k}),$$

de même, on a : $\beta = at_{1j}(T_j - t_{1j})$ puisque ${}^S t_{1k} = t_{1j}$ et ${}^S T_k = T_j$.

On peut alors déduire les valeurs v et a telles que $\alpha = \beta$, à savoir :

$$at_{1j}(T_j - t_{1j}) = A_k t_{1k}(T_k - t_{1k}) \text{ avec } t_{1j} = \frac{V_j}{A_j}, t_{1k} = \frac{V_k}{A_k}, T_j = \frac{V_j}{A_j} + \frac{Q_j}{V_j}, T_k = \frac{V_k}{A_k} + \frac{Q_k}{V_k},$$

Il en résulte que : $a = A_j \frac{Q_k}{Q_j}$ et $v = at_{1j} = V_j \frac{Q_k}{Q_j}$.

Remarque : On observe dans la figure 5.b que $a > A_j$ et $v > V_j$, ce qui est dû au fait que l'aire β ($= \alpha = Q_k$) est plus grande que l'aire, égale à Q_j , du trapèze relatif à la vitesse $\dot{q}_j$. Ce constat peut également être déduit des formules précédentes.

On va à présent illustrer ces calculs en considérant un déplacement du bras du robot, d'un point **A** vers un point **B**, qui nécessite la mise en mouvement des articulations no. 3 (coude) et 4 (poignet 1). Pour cela, on redéfinit les points **A** et **B** décrits au §2.a comme suit :

- l'articulation no. 3 est égale à 0° au point **A** et à 80° au point **B**,
- l'articulation no. 4 est égale à 0° au point **A** et à 140° au point **B**,
- les valeurs des autres articulations sont les mêmes pour les deux points, à savoir : -90° pour les articulations no. 1 (base), 2 (épaule) et 0° pour les articulations no. 5, 6.

Comme indiqué au §2.a, la vitesse de croisière est fixée à $60^\circ/s$, l'accélération maximale souhaitée est fixée à $80^\circ/s^2$.

Réalisation 5 :

- 1) Réaliser un programme Polyscope permettant au bras du robot d'exécuter un tel mouvement.
- 2) Visualiser à l'aide de UR Log Viewer la position, la vitesse et l'accélération au cours du mouvement des articulations no. 3 et 4 :
 - Qu'elle est l'articulation la plus lente ? Qu'elle est l'articulation dont la trajectoire est synchronisée ?
 - En extraire les valeurs a et v de la trajectoire synchronisée.
- 3) Comparer les valeurs mesurées de a et v avec celles obtenues avec les calculs précédents. Comparer les valeurs mesurées de t_1, t_2 et T avec celles obtenues par le calcul.