

# Génération de la trajectoire optimale en ligne avec la garantie de sécurité dans un espace de travail partagé

**Pu ZHENG**

PhD student, IMAG, Grenoble

*pu.zheng@univ-grenoble-alpes.fr*

IMAG

# Outline

- 1 Aspect Général
  - Context industriel
  - Context CIRCULAR
  - Robots et l'industrie
- 2 Problématique du sujet
- 3 LWR (light-weight robot)
- 4 Approche contrôle optimale
  - Linéaire MPC
  - Evitement de la collision en temps continu
  - Choix de l'horizon de la prédition
- 5 Approche perception
- 6 L'environnement de la simulation

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédiction

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

# Industrie 4.0

L'industrie 4.0 est un terme allemand créé en 2013 pour désigner une nouvelle génération d'usine connectées, numérisées, robotisées et intelligentes. Avec la révolution numérique, les frontières entre le monde physique et digital s'amenuisent pour donner vie à une usine 4.0 interconnectée dans laquelle les collaborateurs, les machines et les produits interagissent. [Bla16]

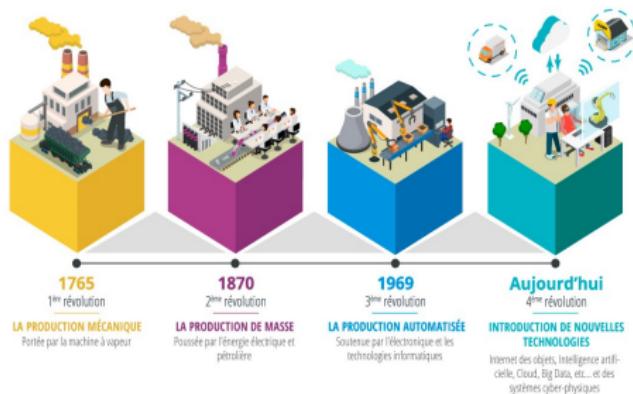


Figure: L'évolution des différentes générations d'usines.<sup>1</sup>

<sup>1</sup><https://www.visiativ-industry.fr/industrie-4-0/>

# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- **Context CIRCULAR**
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédiction

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

# CIRCULAR project

Le projet CIRCULAR se concentre sur les bonnes conditions et les technologies nécessaires pour créer un nouveau système circulaire qui transforme les produits utilisés en nouveau produit.

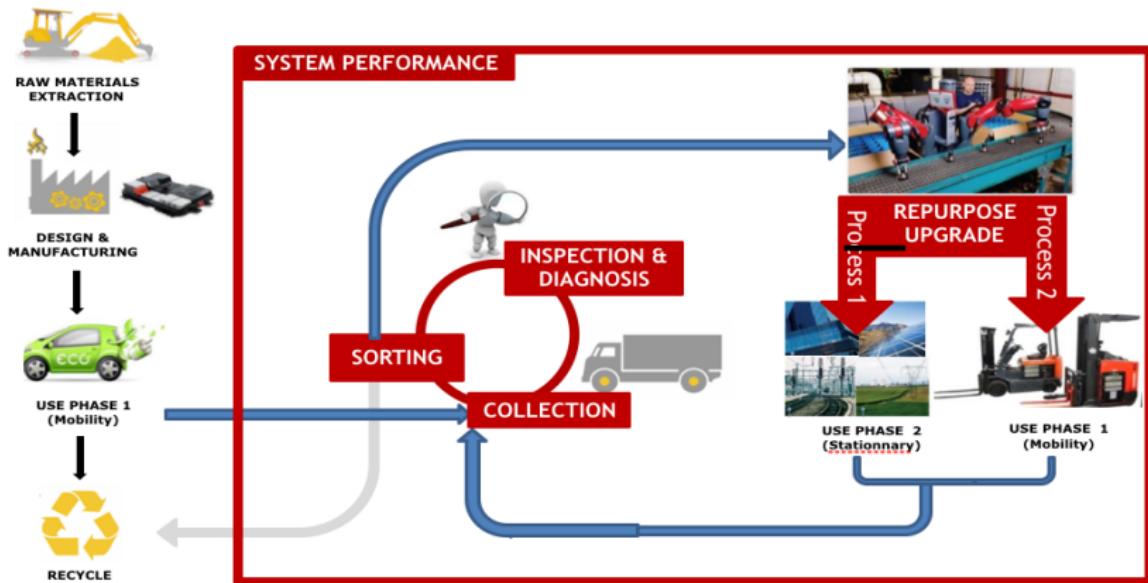


Figure: Schéma représentatif d'un système circulaire

# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

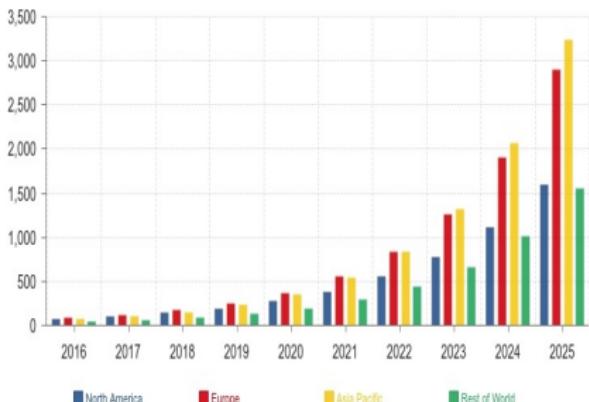
# L'utilisation des robots en industrie

Les robots sont intensivement utilisés dans l'industrie, où ils effectuent sans relâche des tâches répétitives et avec rigueur. Dans les chaînes de montage de l'industrie automobile, ils y remplacent les ouvriers dans les tâches pénibles et dangereuses



## GLOBAL COLLABORATIVE ROBOT MARKET

Global Collaborative Robots Market , By Geography 2017-2026  
(In \$ Millions)



Source: Inkwood Research

Figure: source: Jens Schlueter/Getty images & Franka Emika

## Un marché avec une forte potentiel en robot collaboratif:

“Classical” industrial robot	Future production assistant
fixed installation	flexibly relocatable (manually or on mobile robots)
periodic, repeatable tasks; seldom changes	frequent task changes; tasks seldom repeated
programmed online / offline by a robot specialist	instructed online by a process expert supported by offline methods
infrequent interaction with the worker only during programming	frequent interaction with the worker, even force / precision assistance
worker and robot separated by fences	workspace sharing with the worker
profitable only with medium to large lot sizes	profitable even with small lot sizes

Figure: Comparaison entre les robots industriels classiques et les LWR collaboratif.  
[BKS<sup>+</sup>10]

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

### 3 LWR (light-weight robot)

### 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

### 5 Approche perception

### 6 L'environnement de la simulation

## Problématique

Comment peut-on assurer la sécurité des travailleurs dans un espace de travail partagé avec les robots collaboratifs?



## Quelques importantes critères:

- **Réactivité:** Le robot doit prendre en compte de façon réactive les nouvelles informations provenant des capteurs pour s'adapter à l'environnement.
- **Performance:** Le robot doit réaliser ses tâches de façon optimal.
- **Contrainte satisfaction:** Le robot doit toujours vérifier les contraintes.

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

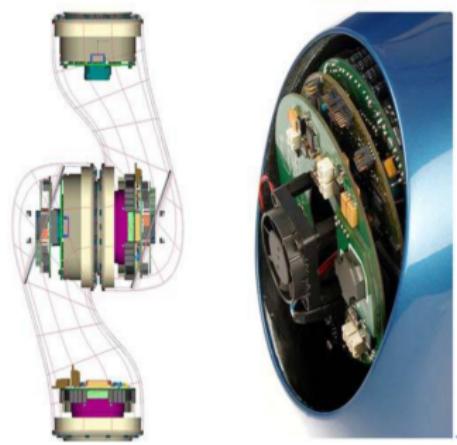
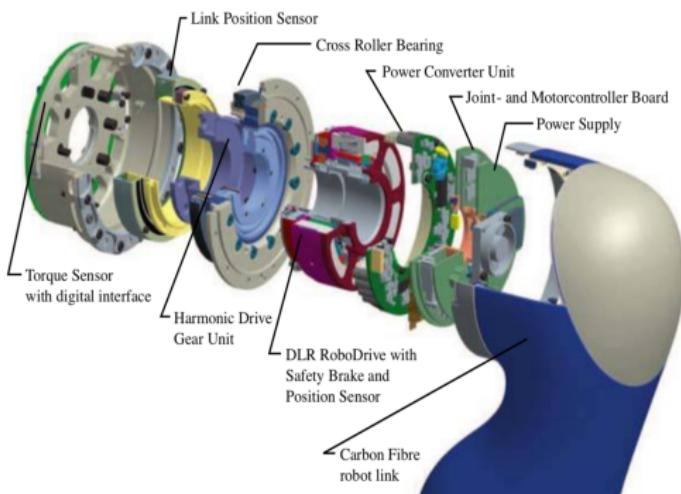
- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

Le robot dédié aux applications dans un espace de travail avec humain. Voici quelques caractéristiques:

- Redondance cinématique pour avoir une approche du bras humain
- Une proportion load-to-weight de 1:1 environ (ou moins)
- Une masse moins de 15 Kg (Fibre carbone) avec un espace de travail plus qu'un mètre.
- Contrôle au niveau articulaire peut être réaliser à 3kHz



## évaluation de la sécurité pour human-robot intéraction:

$$\text{HIC}_{36} = \max_{\Delta t} \left\{ \Delta t \left( \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \|\ddot{\mathbf{x}}_H\|_2 dt \right)^{\left(\frac{5}{2}\right)} \right\} \leq 650$$
$$\Delta t = t_2 - t_1 \leq \Delta t_{\max} = 36\text{ms.}$$

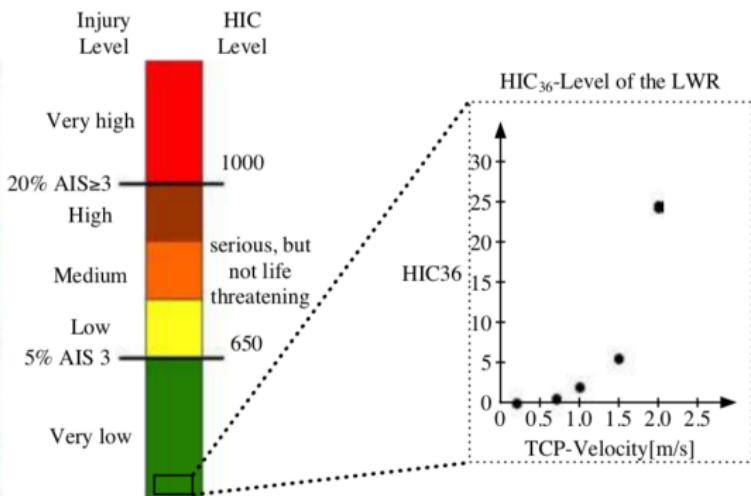


Figure: source: [ASHO<sup>+</sup>07]

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

## Modèle prédictive contrôle

MPC est une méthode de contrôle avancée qui détermine l'action de contrôle en résolu en ligne à chaque pas d'échantillonnage de temps un problème d'optimisation en boucle ouverte, basée sur l'état actuel du système.

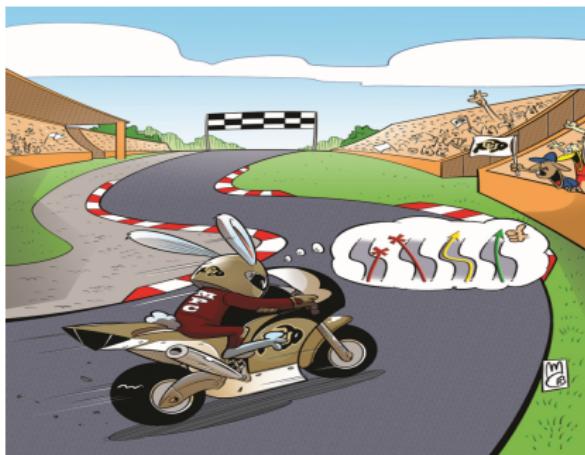


Figure: source: Marco M. Nicotra.

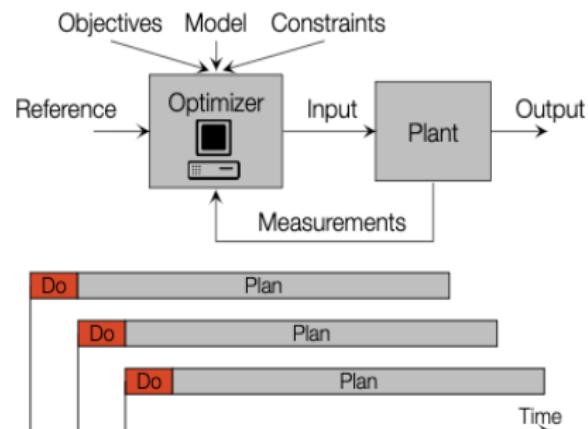
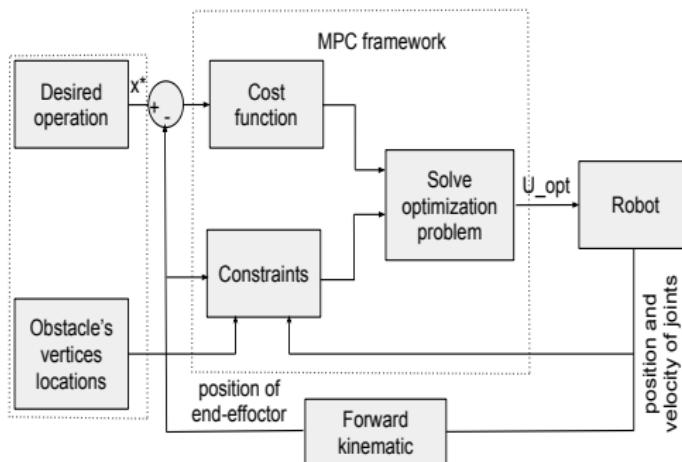


Figure: source: Manfred Morari ETH zurich

# Pourquoi utiliser MPC dans notre travail ?

MPC est capable de contrôler des systèmes MIMO (multi-input and multi-output) sous contraintes. L'action n'est pas non seulement déterminée à partir de l'état actuel, mais aussi prendre en compte l'évolution du système et l'environnement dans le future.

- Définir un objectif
    - ▶ Suivie de la trajectoire
  - Définir les contraintes
    - ▶ Contraintes intrinsèques du robot
    - ▶ Contraintes liées à la sécurité
  - Anticipation ou prédition de l'environnement



# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédiction

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

# Modèle linéaire discrétisé pour la prédiction

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (1)$$

avec,

$$x_k = \begin{bmatrix} q_k \\ \dot{q}_k \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n},$$

$$A = \begin{bmatrix} I & I\Delta t \\ 0 & I \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n},$$

$$B = \begin{bmatrix} I\frac{\Delta t^2}{2} \\ I\Delta t \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n \times n}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix}}_{P_x} x_0 + \underbrace{\begin{bmatrix} B & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ A^{N-1}B & \cdots & B \end{bmatrix}}_{P_u} \underbrace{\begin{bmatrix} u_0 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}}. \quad (2)$$

L'objectif du schéma linéaire du MPC est:

$$\underset{\mathbf{u}}{\text{minimize}} \quad \sum_{k=0}^{N-1} \|x_{k+1} - x_{k+1}^{\text{des}}\|_Q^2 + \|u_k - u_k^{\text{des}}\|_R^2 \quad (3a)$$

$$\text{subject to } \forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \underline{u} \leq u_k \leq \bar{u}, \quad (3b)$$

$$\forall k \in \{1, \dots, N\}, \underline{q} \leq q_k \leq \bar{q}, \quad (3c)$$

$$\forall k \in \{1, \dots, N-1\}, \underline{\dot{q}} \leq \dot{q}_k \leq \bar{\dot{q}}, \quad (3d)$$

$$\dot{q}_N = 0 \quad (3e)$$

L'équation (3e) assure à la fois la faisabilité récurrente et permet d'introduire la notion de "Passive safety" dans notre schéma MPC.

## Passive safety

Il est impossible de garantir qu'il y a aucune collision dans un environnement partiel inconnu, mais au moins on peut garantir s'il y a une collision, le robot est à l'arrêt.

# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

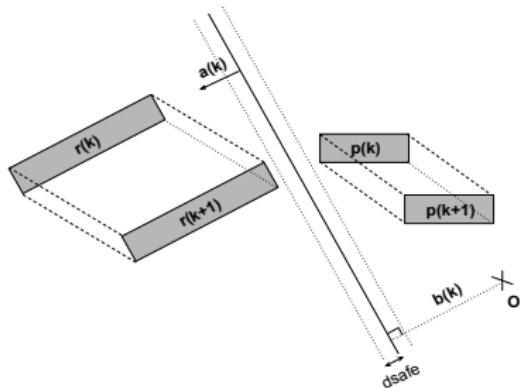
## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- **Evitement de la collision en temps continu**
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

- Définir contrainte d'évitement en temps continu



- $\{r^1, r^2, \dots\}$  sommets liés à la personne:

$$a_k p_k^j \leq b_k,$$

$$a_k p_{k+1}^j \leq b_k,$$

- $\{p^1, p^2, \dots\}$  sommets liés au robot:

$$a_k r_k^i \geq b_k + d,$$

$$a_k r_{k+1}^i \geq b_k + d,$$

## Plan de séparateur

S'il existe un plan  $a_k x = b_k$  qui sépare les sommets de la personne d'un côté et les sommets du robot d'autre côté durant l'intervalle de temps  $t_k$  et  $t_{k+1}$ , alors on dit qu'ils ne sont pas en collision pendant cet intervalle de temps.

Notre problème de la planification se divise donc en deux sous problèmes:

- calcule le plan de séparateur: Pour chaque intervalle de temps  $[k, k + 1]$ ,  $k \in \{0, \dots, N - 1\}$ , on calcule un plan de séparateur avec un LPs (Linear programming) :

$$\underset{a_k, b_k, d}{\text{maximize}} \quad d$$

$$\text{subject to } \forall j, \quad a_k p_k^j \leq b_k,$$

$$\forall j, \quad a_k p_{k+1}^j \leq b_k,$$

$$\forall i, \quad a_k r_k^i \geq b_k + d,$$

$$\forall i, \quad a_k r_{k+1}^i \geq b_k + d,$$

$$-1 \leq a_k \leq 1,$$

$$1 - \varepsilon \leq a_k^p a_k^T \leq 1$$

- calcule la trajectoire sans collision avec les plans calculés précédemment:

$$\min_{\mathbf{u}} \sum_{k=0}^{N-1} \|x_{k+1} - x_{k+1}^{des}\|_Q^2 + \|u_k - u_k^{des}\|_R^2$$

s.t.  $\forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \underline{u} \leq u_k \leq \bar{u},$

$\forall k \in \{1, \dots, N\}, \underline{q} \leq q_k \leq \bar{q},$

$\forall k \in \{1, \dots, N-1\}, \underline{\dot{q}} \leq \dot{q}_k \leq \bar{\dot{q}},$

$\dot{q}_N = 0,$

$\forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \forall i,$

$$a_k r^i(q_k^p) + a_k J(q_k^p)(q_k - q_k^p) \geq b_k + d_{safe},$$

$\forall k \in \{0, \dots, N-1\}, \forall i,$

$$a_k r^i(q_{k+1}^p) + a_k J(q_{k+1}^p)(q_{k+1} - q_{k+1}^p) \geq b_k + d_{safe}$$

# Outline

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition**

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

## borne inférieur

Le robot doit être en arrêt à la fin de l'horizon de la prédiction  $\rightarrow T_{low} = \frac{V_{max}}{a_{max}}$

Prenons  $V_{max} = 2 \text{ m.s}^{-1}$  et  $a_{max} = 10 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $T_{low} = 0.2 \text{ s.}$

## borne supérieur

La vitesse de la main de l'humain en situation régulière est  $1 \text{ m.s}^{-1}$  avec une accélération de  $5 \text{ m.s}^{-2}$ .

Considérons  $d_{safe} = 20 \text{ cm}$ ,  $T_{upper} = 0.3 \text{ s.}$  La prédiction du mouvement de la personne peut être pas du tout précis si on prédit trop.

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

# Table of Contents

## 1 Aspect Général

- Context industriel
- Context CIRCULAR
- Robots et l'industrie

## 2 Problématique du sujet

## 3 LWR (light-weight robot)

## 4 Approche contrôle optimale

- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

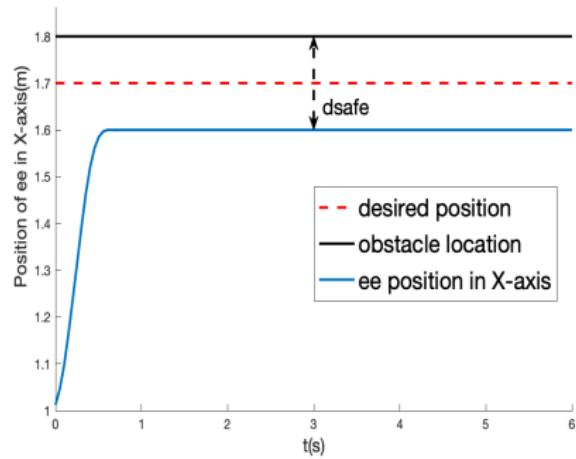
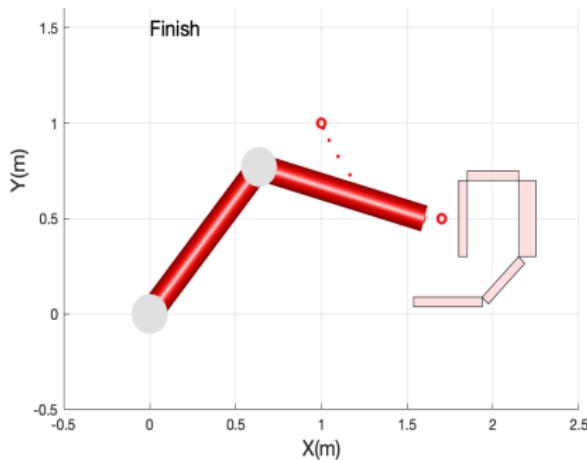
## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

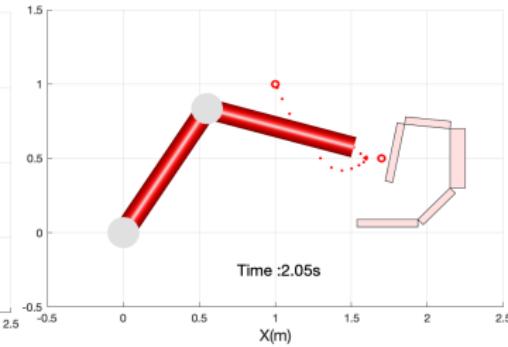
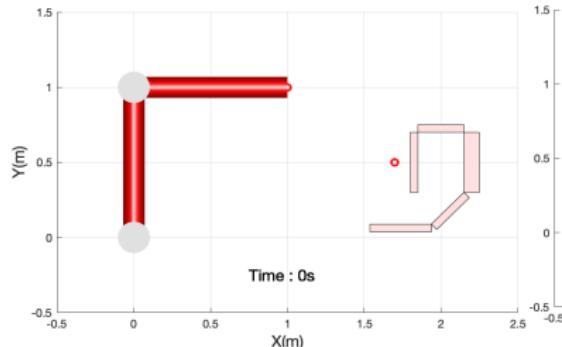
## Simulation en 2D

L'horizon de la prédition est égale à 0.3 s, le pas d'échantillonnage est 0.05 s, la distance de sécurité est égale à 0.2 m.

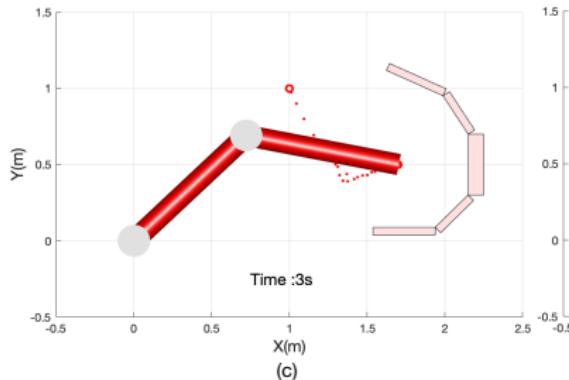
- Non atteignable objectif



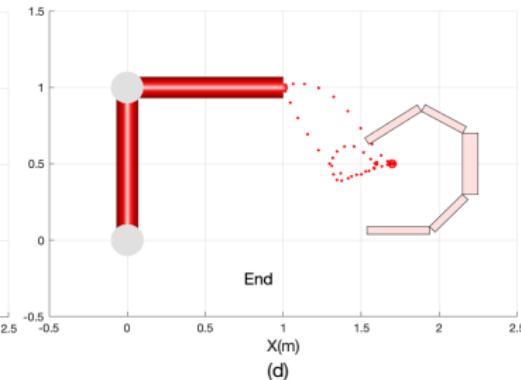
- Réaliser une tâche en présence de la perturbation d'une personne



(b)



(c)



(d)

## Simulation en 3D

# References I

-  Alin Albu-Schäffer, Sami Haddadin, Ch Ott, Andreas Stemmer, Thomas Wimböck, and Gerhard Hirzinger, *The dlr lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments*, Industrial Robot: an international journal **34** (2007), no. 5, 376–385.
-  Rainer Bischoff, Johannes Kurth, Günter Schreiber, Ralf Koeppe, Alin Albu-Schäffer, Alexander Beyer, Oliver Eiberger, Sami Haddadin, Andreas Stemmer, Gerhard Grunwald, et al., *The kuka-dlr lightweight robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing*, ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics), VDE, 2010, pp. 1–8.
-  Max Blanchet, *Industrie 4.0 nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique*, Outre-Terre (2016), no. 1, 62–85.