

# Génération de trajectoire optimale en ligne avec 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 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]

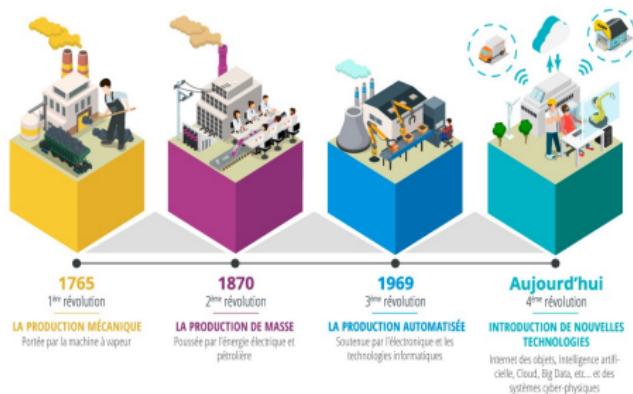


Figure: L'évolution des différentes générations d'usines.<sup>1</sup>

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

# 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.

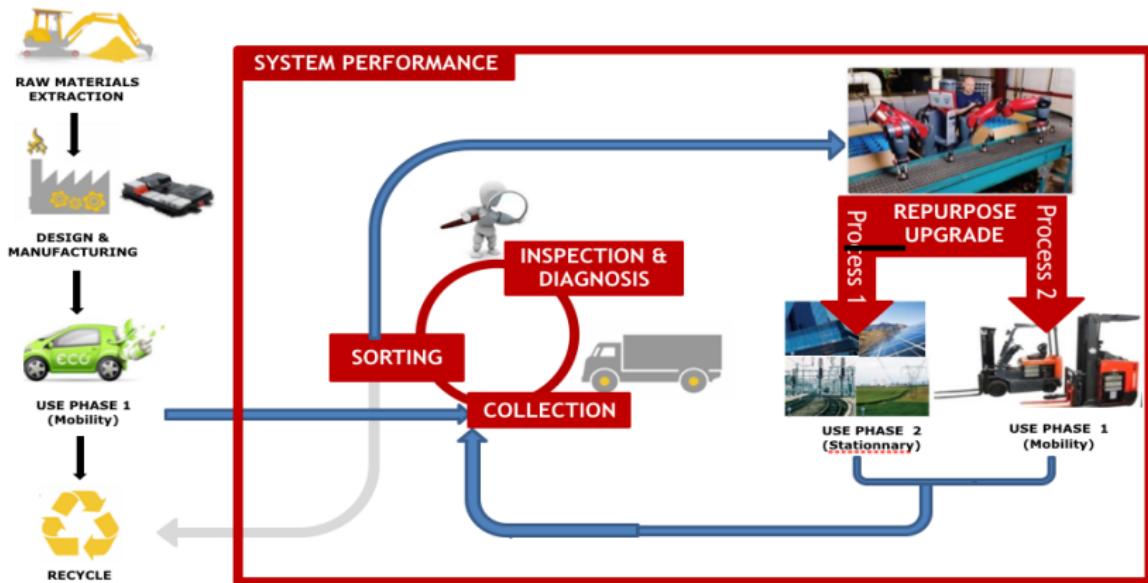


Figure: Schéma représentatif d'un système circulaire

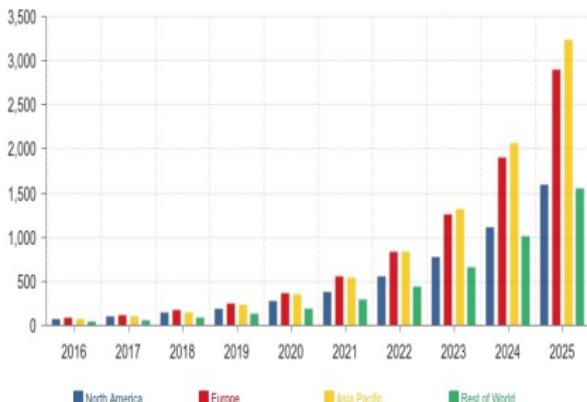
# L'utilisation des robots en industrie

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 un fort 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 critères importants :

- **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.
- **Satisfaction des contraintes :** Le robot doit toujours vérifier ses propres contraintes physiques et celles de son environnement .

# 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

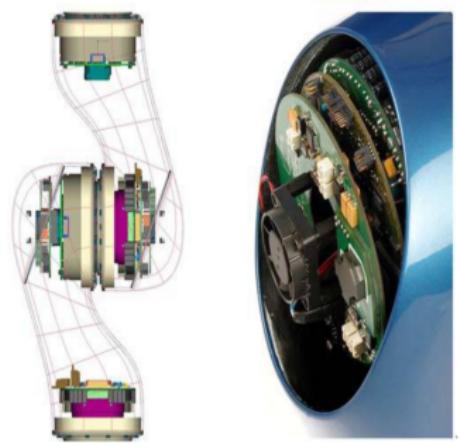
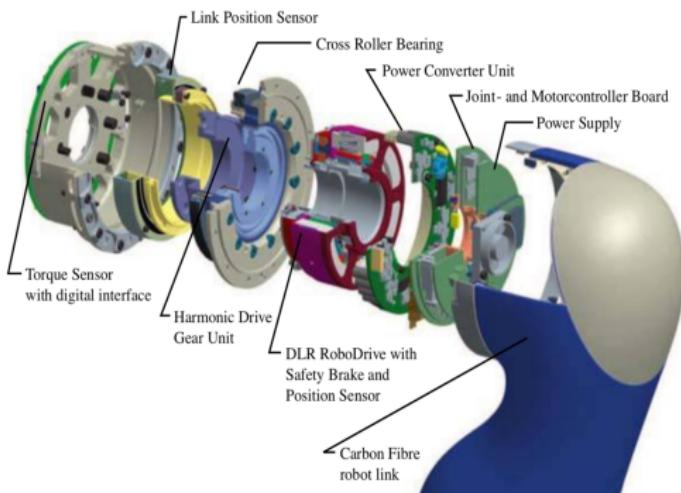
- Linéaire MPC
- Evitement de la collision en temps continu
- Choix de l'horizon de la prédition

## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

Un robot dédié aux applications dans un espace de travail partagé avec un 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 de l'interaction pour homme-robot par HIC (Head Injury Criteria) :

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

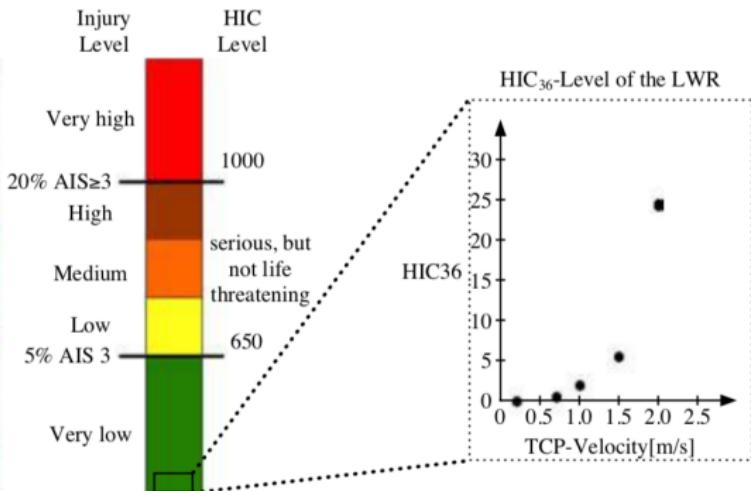


Figure: source: [ASHO<sup>+</sup>07]

# 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

# Model Predictive Control

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

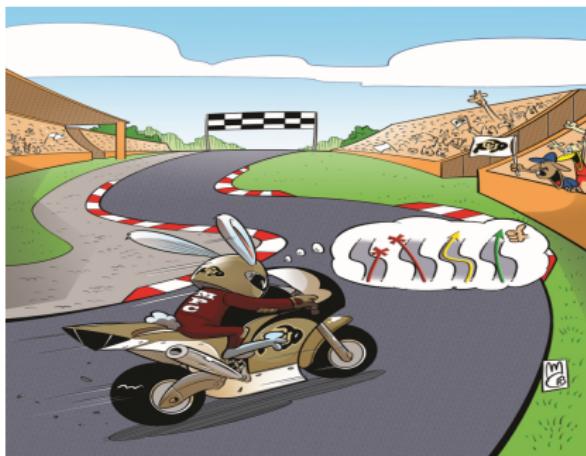


Figure: source: Marco M. Nicotra.

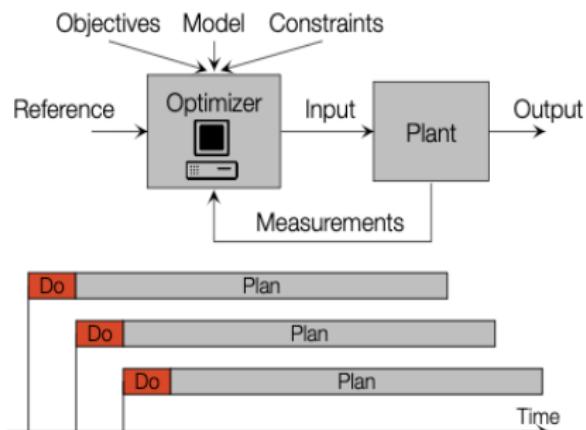
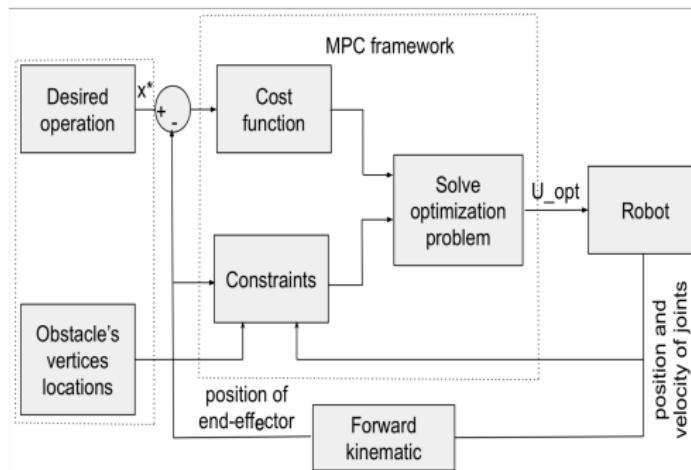


Figure: source: Manfred Morari ETH zurich

# 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 reprend aussi en compte l'évolution du système et l'environnement dans le futur.

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



# Modèle linéaire discréte 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:

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

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

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

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

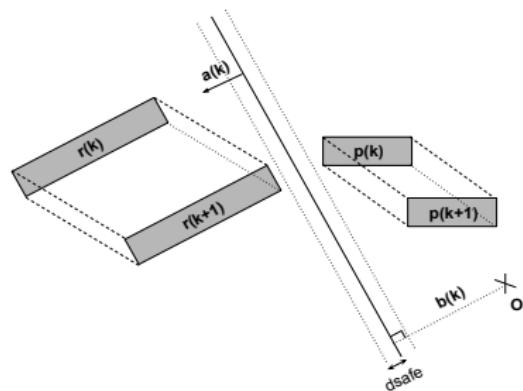
$$\dot{q}_N = 0 \quad (3e)$$

L'équation (3e) assure à la fois la faisabilité récursive 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 que s'il y a une collision, le robot est à l'arrêt au moment de la collision.

- Définir une 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 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 de l'autre côté durant l'intervalle de temps  $t_k$  et  $t_{k+1}$ , alors on sait qu'ils ne sont pas en collision pendant cet intervalle de temps.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\dot{q}_N = 0,$

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

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

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

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

## borne inférieure

Le robot doit être en arrêt à la fin de l'horizon de 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 supérieure

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 essaie prédire trop loin dans le futur.

# 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

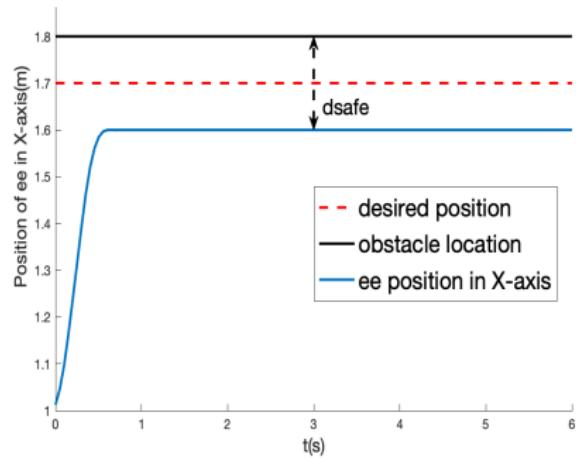
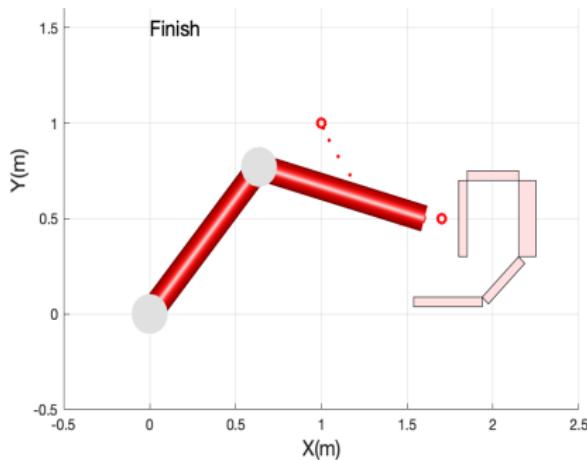
## 5 Approche perception

## 6 L'environnement de la simulation

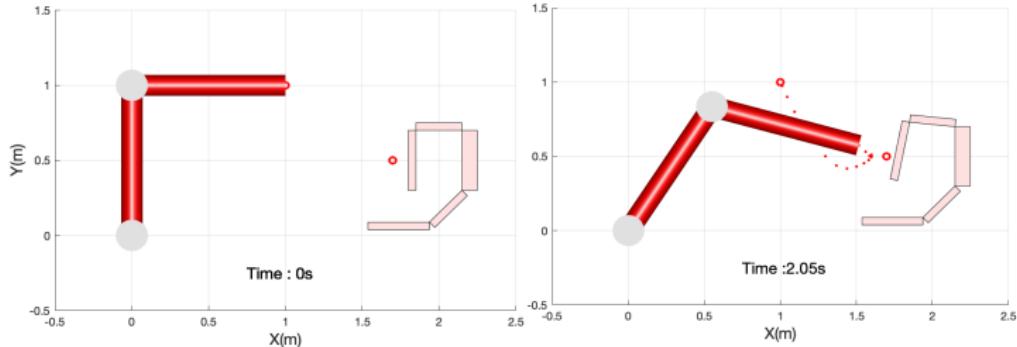
## Simulation en 2D

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.

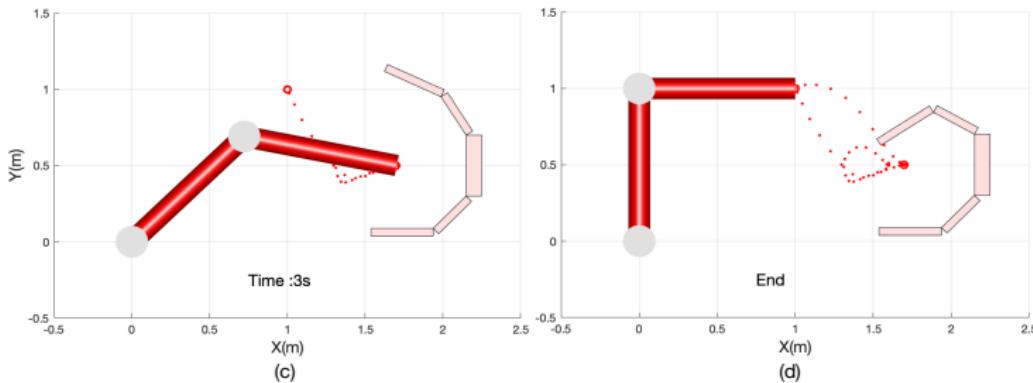
- Objectif non atteignable



- Réaliser une tâche en présence 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.