

# État de l’art des différentes techniques de tracking et de localisation et application des ces techniques aux essaims de robots et aux robots Mona

Tristan Guichaoua  
t7guicha@enib.fr

23 janvier 2022

## Résumé

Cet article réalise une veille technologique des différents systèmes et techniques de tracking ; aussi bien sur technologies de tracking en général, mais aussi celle plus spécifiquement utilisées dans le domaine des essaims de robots. Le but étant d’appliquer ces technologies dans le cadre d’une utilisation avec les robots Mona [1], afin de, par exemple, étendre leur champ de perception.

*Mots-clés* — tracking, localisation, essaim de robots, Mona

## 1 Introduction

### 1.1 Présentation

Les essaims de robots font partie de ce que l’on appelle des Systèmes Multi-Agent (SMA). Dans un SMA, chaque agent est une entité autonome avec un champ de perception et d’action limité et disposant de canaux de communication avec les autres agents. Certains comportements de ces agents peuvent être inspirés des insectes sociaux comme les fourmis : chaque fourmi n’a qu’une vision limitée de son environnement, pourtant toute une colonie peut localiser et transporter jusqu’à la fourmilière de la nourriture. Dans le cadre des essaims de robots, chaque robot représente un agent.

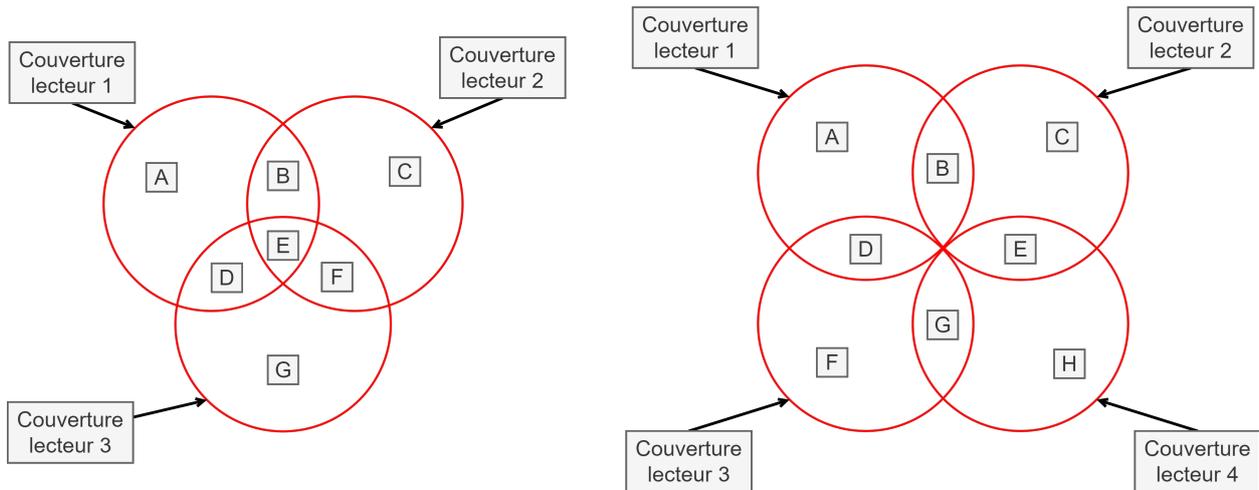
Considérons le scénario où des personnes se retrouvent piégées dans un bâtiment après une catastrophe. On pourrait utiliser un essaim de centaines de petits robots qui pourrait parcourir le bâtiment pour localiser les survivants tout en indiquant un chemin viable pour les secours [2].

Dans certains cas d’utilisation, il est nécessaire d’obtenir la position des robots, que ce soit de manière relative (les uns par rapport aux autres) ou de manière absolue (par rapport à une salle ou un bâtiment, par exemple). Pour cela, il existe différentes technologies de tracking, chacune reposant sur différents principes (optique, radio-fréquence, infra-rouge, etc.).

Certaines de ces technologies peuvent être appliquées aux essaims de robots pour, par exemple, faire de l’augmentation de perception, en renvoyant aux robots plus d’information que leurs capteurs peuvent capter ; ou encore pouvoir synchroniser des robots physiques avec des robots simulés par ordinateur [3].

L’étude des différentes technologies de tracking se fera en deux temps : dans un premier temps, dans la section 2, les technologies seront présentées avec un résumé de leur principe de fonctionnement, puis dans un deuxième temps, dans la section 3, nous discuterons de la façon dont peuvent être utilisées ces technologies dans le domaine des essaims de robots et plus précisément de leur compatibilité avec les robots Mona.

FIGURE 1 – Disposition des lecteurs RFID [5]



## 1.2 Méthodes de recherche

Lors de mes recherches, j'ai procédé en deux temps. Dans un premier temps, j'ai recherché des articles traitants du tracking de manière général. Le but étant de réaliser une veille sur les technologies du domaine. Pour cela, j'ai fait une recherche sur *Google Scholar* avec le mot-clé "tracking system". Puis, dans un second temps, j'ai voulu me concentrer sur les technologies plus portées sur les essaims de robots. J'ai donc réalisé une seconde recherche avec les mots-clés : "tracking system", "swarm robotics", "robot swarm", "multi-agent" et "multi agent".

## 2 État de l'art

### 2.1 RFID

Le RFID (Radio-Frequency IDentification, radio-identification) est une technologie d'identification sans-fil. D'un côté, nous avons une puce RFID, qui contient des informations et de l'autre un lecteur RFID qui va émettre une onde radio qui va à la fois alimenter la puce, mais aussi lui envoyer une requête pour réaliser la lecture des informations contenues sur la puce. Cette technologie est utilisée dans divers cas : badge d'accès, paiements sans contact, puce de traçage d'animaux, etc. La portée peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres en fonction de l'application et du type de puce utilisée. Le tableau 1 résume les différentes bandes de fréquence utilisées par le RFID, ainsi que leurs applications et leurs portées. [4]

Al-Ali et al. [5] décrit une application possible du RFID dans le cadre d'un système de tracking d'enfants dans une large zone (parc, centre commercial). La puce RFID, qui contient les informations relatives à l'enfant, est portée par l'enfant. Des lecteurs RFID sont disposés dans toute la zone à couvrir. Les lecteurs transmettent ensuite l'identifiant des puces lues dans leur champ d'action à une base de données, qui peut ensuite être consultée via une interface pour déterminer l'emplacement d'un enfant.

Chaque lecteur couvre un rayon de 30 m. Différentes méthodes ont été testées pour affiner la position dans un interval de 10 m. Ces méthodes sont : la force du signal reçu (RSSI), le délai de transmission d'un signal et la mécanique de superposition des aires. La mécanique de superposition est celle qui apporte une plus grande précision.

Le système a été testé sur une aire de 105 m<sup>2</sup>, avec deux scénarios pour la disposition des lecteurs : une avec 3 lecteurs et une autre avec 4 (Figure 1). Avec 3 lecteurs, la précision est de 75 %, contre 95 % avec 4 lecteurs.

TABLE 1 – Fréquences et application du RFID [4]

Familles de fréquences	Bandes de fréquences	Portée	Applications typiques
LF	120–150 kHz	10 cm–50 cm	Suivi des animaux, gestion des accès
HF	13.56 MHz	10 cm–1 m	Suivi des bagages, des livres dans les bibliothèques, surveillance électronique d'articles, porte-monnaie électronique, contrôle d'accès
UHF	433 MHz	1–100 m	Suivi dans la chaîne d'approvisionnement et gestion d'entrepôt, applications pour la défense
UHF	865–868 MHz (Europe) 902–928 MHz (Amérique du Nord)	1–12 m	Code-barres EAN, suivi de chemin de fer <sup>41</sup> , système de télécommande
SHF	2 450–5 800 MHz	1–2 m	Télépéage, suivi de chemin de fer, 802.11 WLAN, standards Bluetooth
ULB	3.1–10 GHz	Supérieur à 200 m	-

## 2.2 Wi-Fi

La localisation sur une large zone avec les technologies radio-fréquence nécessite l'installation préalable de composant pour couvrir toute la zone et généralement de systèmes *hardware* dédiés [6]. Ces problématiques sont abordées dans Bahl et al. [6] qui présente un système de localisation d'utilisateur au sein d'un bâtiment nommé RADAR et développé par Microsoft.

Cette technologie se repose sur la couverture Wi-Fi du bâtiment cible et des appareils portables. En effet, de nos jours, la quasi-totalité des bâtiments (bureaux, bibliothèques, universités, etc.) sont couverts par un réseau Wi-Fi. Cela signifie que l'utilisation de RADAR dans ce genre de lieu ne nécessite aucune installation supplémentaire, et donc aucun coût supplémentaire. De plus, cette solution est purement *software*, elle peut donc être utilisée avec n'importe quels dispositifs pouvant utiliser le Wi-Fi (smartphones, tablettes, etc.).

RADAR fonctionne sur le principe suivant : tout d'abord, une carte des signaux radio du bâtiment est créée. Cette carte est une base de données de différentes localisations dans le bâtiment associées à la force des signaux des points d'accès Wi-Fi détectés à cet endroit. Pour ensuite localiser un utilisateur dans le bâtiment, l'appareil utilisé par celui-ci capte les signaux des points d'accès à proximité, puis recherche dans la base de données la meilleure correspondance. La localisation est obtenue en regardant la localisation associée à la correspondance.

Lors de la localisation d'un utilisateur statique, la marge d'erreur est de l'ordre de 2.5 m. Dans le cas d'un utilisateur qui se déplace, en utilisant un algorithme type Viterbi qui se base sur les  $n$  dernières positions estimées de l'utilisateur pour déterminer la position la plus probable de l'utilisateur, la marge d'erreur moyenne est de 2.37 m.

## 2.3 Arena d'Iridia

Stranieri et al. [3] présente un système de tracking, l'Arena Tracking System (ATS), conçu pour les larges expériences multi-robots ou impliquant des essaims de robots. L'objectif de ce système est de proposer un outil aux chercheurs pour enregistrer et suivre le déroulement de leurs expériences.

"L'Arène" (la salle dans laquelle est installé le dispositif) est une grande salle de 990 cm par

705 cm, qui peut accueillir une expérience dans toute la zone ou plusieurs expériences en parallèles en divisant l'espace. Sur le plafond, sont disposées 16 caméras arrangées en une matrice de 4 par 4.

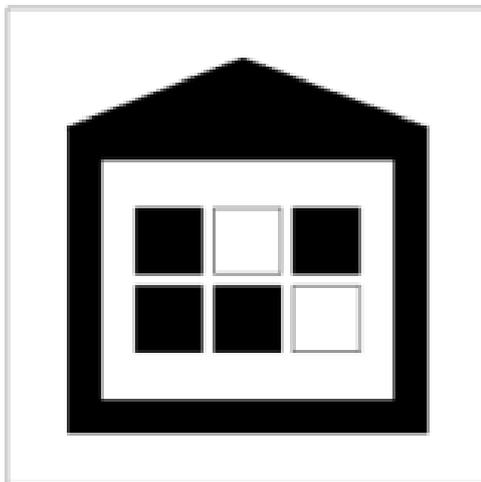
La caméra utilisée est la *Prosilica GC1600 C*, fabriquée par Allied Vision Technologies (les spécifications sont présentées dans le tableau 2).

Afin de suivre chaque robot lors de leurs déplacements, le système utilise un marqueur, qui doit être facilement détectable et décodable même avec une petite image. Ces marqueurs sont placés sur le dessus des robots (Figure 2).

L'ATS peut être utilisé avec ARGoS, un simulateur d'essaim de robots développé par IRIDIA. ARGoS est un système modulaire qui repose sur des plugins. Le plugin *Iridia Tracking System Physics Engine* permet de faire la liaison entre l'ATS et ARGoS. Ce plugin agit comme un moteur physique qui, au lieu de calculer la position des robots, la reçoit du système de tracking. Une fois les robots positionnés dans l'environnement virtuel, ils peuvent recevoir des informations de ce dernier via des capteurs virtuels, mais aussi agir sur lui via des actionneurs virtuels. Cette intégration avec ARGoS permet, par exemple, de réaliser des expériences avec des capteurs ou actionneurs qui ne sont pas présents sur les robots, ou encore de prototyper des capteurs ou actionneurs qui seront montés sur les robots dans le futur.

TABLE 2 – Spécification de la caméra [3]

Prosilica GC 1600	
Interface	IEEE 802.3 1000baseT
Résolution	1620 x 1220
Frame rate max.	15 fps
Modes de couleur	Gray Scale, RGB
Dimensions (L x l x H)	59 x 46 x 33 mm
Masse	97 g



(a) Exemple de marqueur



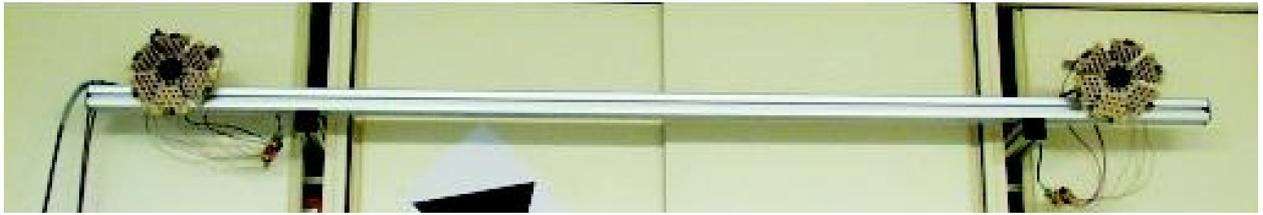
(b) Marqueurs monté sur des robots e-puck

FIGURE 2 – Exemple de marqueur utilisé par IRIDIA [3]

## 2.4 Tracking optique Infrarouge

Ribo et al. [7] présente un dispositif de tracking optique stéréoscopique. Le capteur se compose de deux caméras CCD à balayage progressif avec une fréquence d'image à 30 Hz, équipées d'optiques ajustables pour élargir l'angle de vue jusqu'à 50°, de filtres à infrarouge (IR) et de projecteur à LEDs IR. Les caméras sont montées sur une monture de 2 m (Figure 3), qui permet d'ajuster

FIGURE 3 – Monture avec les deux caméras infrarouge [7]



la distance entre les caméras. Le dispositif traque la position spatiale de marqueurs qui sont des boules réfléchissantes, qui réfléchit les IR. En fonction du nombre de marqueurs attachés à un objet, on peut déterminer plus ou moins de degrés de liberté (position et orientation) de cet objet. Avec un marqueur, on obtient un point, on peut donc déterminer la position de l'objet. Avec deux marqueurs, on obtient une ligne, on peut donc déterminer la position de l'objet et deux degrés de l'orientation (celui suivant la direction de la ligne ne peut pas être obtenue). Enfin avec trois ou plus marqueurs, on peut obtenir la position et l'orientation de l'objet.

Ce système peut suivre l'évolution de 25 cibles à une fréquence de 30 Hz.

## 2.5 Localisation distribuée

Les robots qui composent un essaim sont des entités actives. C'est-à-dire qu'il est possible de se servir de cette propriété pour réaliser la localisation des robots sans recourir à des systèmes externes, comme présentés dans les différentes méthodes vues ci-dessus.

de Sá et al. [8], présente deux algorithmes permettant aux robots de se localiser par rapport à des nœuds de références (qui peuvent être des robots de l'essaim) que l'on appelle *ancres* et qui connaissent leur position par rapport à un système de coordonnées donné. Chacun des algorithmes se base sur une technique d'optimisation différente : le premier se base sur le *Particle Swarm Optimization* (PSO), et le second sur le *Backtracking Search Algorithm* (BSA). La méthode de localisation se découpe en trois étapes :

1. Les ancres communiquent leur position à leurs plus proches voisins, qui vont à leur tour ré-émettre le message à leurs plus proches voisins et ainsi de suite. Chaque nœud connaît donc la position de chaque ancre, ainsi que le plus court chemin entre eux et les ancres.
2. Pour chaque ancre, on établit une *bounding box* autour de l'ancre et qui contient le robot. On prend ensuite le centre de l'intersection de toutes ces *bounding box* comme la première estimation de la position.
3. Chaque robot peut ensuite réévaluer sa position en fonction de la position et de la distance avec ces voisins, en utilisant l'un ou l'autre des algorithmes d'optimisation PSO ou BSA. Un coefficient de confiance est associé à la position de chaque voisin lié à la précision de celle-ci. Ce coefficient est calculé soit via le nombre de sauts qui sépare l'ancre du voisin, soit sur la taille de la surface d'intersection de ses *bounding box* évaluées dans la deuxième étape.

Les résultats indiquent que la méthode BSA avec un coefficient de confiance basée sur le nombre de sauts entre l'ancre et le robot offre une plus grande précision sur la position.

## 2.6 Récapitulatif

TABLE 3 – Récapitulatif des technologies de tracking

Technologie	Principe	Champs d'action	Prérequis
RFID	Ondes radio	Larges zones	Couverture lecteurs RFID
Wi-Fi	Ondes radio	Bâtiments / larges zones	Couverture points d'accès Wi-Fi
Arena d'Iridia	Optique	Grandes salles	Plafonnier de caméras
Tracking optique IR	Optique	<i>Non indiqué</i>	Mis en place de la double caméra
Localisation distribuée	Communication inter-robot	–	Communication sans fil inter-robot

## 3 Discussion

Mona est un robot mobile à bas prix, qui est *open-source* et *open-hardware*. Il est très utilisé dans les domaines de l'éducation et de la recherche. Il est équipé d'un microcontrôleur ATmega 328, qui est compatible avec Arduino. Cinq capteurs de proximité IR à faible portée sont montés sur la partie avant de Mona, espacés de 35°. Ces capteurs servent à éviter les collisions lors des déplacements. Mona possède des bus de communication interne (USART, I<sup>2</sup>C et SPI) pour la communication entre les modules ou encore pour la programmation du microcontrôleur. Il peut aussi communiquer avec l'extérieur via des add-on (Wi-Fi, radio-fréquences ou encore Bluetooth) ou communiquer de robot à robot via les capteurs de proximité IR, bien que cette méthode soit de moins bonne qualité et moins rapide du fait de la limitation de distance des capteurs (approximativement  $5 \pm 1$  cm) [1].

Le choix de la méthode de tracking pour un essaim de robots va dépendre de l'application que l'on souhaite. Si, par exemple, les robots opèrent en intérieur ou en extérieur, si leurs champs d'action est étendu ou restreint, la vitesse de déplacement des robots ou encore de leur taille. Les essaims de robots sont surtout utilisés dans des cadres expérimentaux, ce qui implique des besoins spécifiques au problème du tracking.

Lorsque l'on souhaite suivre l'évolution d'un essaim de robots dans le temps, que ce soit dans le but de comprendre les mécanismes d'un algorithme ou que ce soit dans le but de concevoir un essaim de robots pour une certaine application, il faut pouvoir acquérir la position de chaque robot de l'essaim et centraliser ces informations pour pouvoir les étudier, sans que cette acquisition n'ait d'impact sur la fonction principale de l'essaim. En effet, si par exemple dans leur application finale, les robots de l'essaim n'ont pas besoin de calculer leur position, embarquer le calcul de position sur les robots lors des phases de test va nécessairement influencer sur les performances étant donné que les robots dans les essaims ont généralement des ressources limitées. En somme, si l'intérêt est de suivre l'évolution de l'ensemble de l'essaim, un système externe est requis.

Le capteur IR stéréoscopique [7] est prévu pour localiser des objets dans un espace 3D, là où les robots évoluent dans une espace 2D. Cette méthode ne convient donc pas à notre utilisation.

Au contraire, l'arena d'Iridia [3] est une solution idéale pour ce genre d'application. Elle a, en effet, été développée pour répondre à ce genre de besoins. Elle offre, de plus, la possibilité de l'associer à ARGoS, ce qui permet, entre autres, de faire de la virtualisation de capteurs et d'actionneurs, ce qui, dans le cadre d'une phase de prototypage, permet de tester différents capteurs et actionneurs même si les robots n'en sont pas équipés.

Néanmoins, cette solution n'est plus envisageable dès lors que le champ d'action des robots est large. Dès lors, des solutions comme les lecteurs RFID [5] ou encore la technologie RADAR [6] sont plus aptes. Elles possèdent cependant un inconvénient : la zone d'action doit être préparée

à l'avance. En effet, pour les RFID, la zone doit être couverte avec des lecteurs RFID et pour RADAR, la zone doit être couverte par des points d'accès Wi-Fi et la couverture Wi-Fi doit être cartographiée. Cela implique que la zone d'action soit connue d'avance. On peut, par exemple, imaginer un essaim de robots qui se déplacent à l'intérieur d'un bâtiment d'une entreprise pour guider des visiteurs.

Néanmoins, ces solutions nous restreignent aux cas où l'on connaîtrait la zone d'action. Si on imagine un scénario où des robots doivent explorer un bâtiment après une catastrophe à la recherche de survivant et dans le but d'établir un chemin praticable pour les secours [2], on ne peut pas recourir à des données pré-existantes sur ce bâtiment, car la catastrophe aurait pu abîmer certaines parties du bâtiment. Dans ce genre de situation, un système de localisation qui ne repose que sur les robots eux-mêmes peut résoudre le problème, comme la localisation distribuée [2]. Les robots se localisent alors en fonction de robots qui servent de référence. On peut imaginer que ces robots de référence se placent à des endroits stratégiques lors de la phase de déploiement.

## 4 Conclusion

Les robots Mona sont orientés pour les domaines de l'éducation et de la recherche [1]. Dans le cadre de la recherche, l'arena d'Iridia [3] est la solution idéale étant donné qu'elle a été créée pour ce but précis. Cependant, dans un cadre éducatif, il reste intéressant d'implémenter les autres méthodes ; d'autant plus, qu'elles sont adaptables pour être utilisées avec les robots Mona.

## Références

- [1] F. Arvin, J. Espinosa, B. Bird, A. West, S. Watson, and B. Lennox, "Mona : An Affordable Open-Source Mobile Robot for Education and Research," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 94, pp. 761–775, June 2019.
- [2] M. Daily, Y. Cho, K. Martin, and D. Payton, "World Embedded Interfaces for Human-Robot Interaction," in *In Proc. of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 125–126, 2003.
- [3] A. Stranieri, A. E. Turgut, M. Salvaro, L. Garattoni, G. Francesca, A. Reina, M. Dorigo, M. Birattari, A. F. D. Roosevelt, A. Stranieri, A. E. Turgut, M. Salvaro, G. Francesca, L. Garattoni, A. Reina, M. Dorigo, and M. Birattari, "Iridia's arena tracking system," tech. rep., IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2013.
- [4] "Radio-identification," *Wikipédia*, Sept. 2021.
- [5] A. R. Al-Ali, F. A. Aloul, N. R. Aji, A. A. Al-Zarouni, and N. H. Fakhro, "Mobile RFID Tracking System," in *2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies : From Theory to Applications*, (Damascus, Syria), pp. 1–4, IEEE, Apr. 2008.
- [6] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, and A. Balachandran, "Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System," p. 13.
- [7] M. Ribo, A. Pinz, and A. L. Fuhrmann, "A new optical tracking system for virtual and augmented reality applications," in *In Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technical Conference*, pp. 1932–1936, 2001.
- [8] A. O. de Sá, N. Nedjah, and L. de Macedo Mourelle, "Distributed efficient localization in swarm robotic systems using swarm intelligence algorithms," *Neurocomputing*, vol. 172, pp. 322–336, Jan. 2016.