

## Coordination d'une flotte de robots mobiles

Girault, Johan

Mél : johan.girault@irccyn.ec-nantes.fr

**Résumé :** Les robots mobiles (AGV) sont employés dans les processus de production automatisés, les systèmes de stockage, les transferts et expédition. Ils constituent une solution extrêmement flexible. Un système de supervision permet de coordonner les actions de la flotte d'AGV. Il inclut les fonctions de guidage, le choix du véhicule réalisant chaque mission de transport, la définition et l'optimisation du parcours, ainsi que l'évitement de conflits (blocages ou collisions) qui constitue le coeur du système. Cet article traite de la synthèse d'un superviseur en temps réel pour coordonner une flotte de robots mobiles. Ce superviseur doit assurer la sécurité de fonctionnement, en l'occurrence l'évitement de collisions et de blocages entre AGV. On se propose de réaliser un tel superviseur à l'aide de la théorie de la supervision de Ramadge et Wonham, basée sur l'utilisation d'automates qui permet d'anticiper le danger de blocages et d'optimiser le fonctionnement de la flotte de robots mobiles.

**Mots clés :** *Automate finis, Contrôle, AGV, Supervision, Temps réel*

**Collaborations :** BA Systèmes (Mordelles - 35310)

## 1 Introduction

Les flottes de véhicules automatisés (dits AGV) sont couramment utilisées pour assurer les transferts dans un atelier. Par rapport à d'autres solutions, par exemple l'utilisation de tapis roulants, l'avantage premier est d'augmenter la flexibilité des systèmes, et son exploitation passe par une complexification du système de contrôle. Cela motive le développement de méthodes et technologies innovantes dans cette direction.

Il existe plusieurs sortes d'AGV et pour ceux qui sont de type mono-directionnels (qui ne peuvent pas se retourner sur place) et que nous étudions, il est possible se retrouver en situation d'autoblocage ou aucun AGV ne peut avancer (voir Figure 1). Ces situations sont évidemment très critiques et peuvent engendrer un arrêt de production pour une entreprise entre dix et trente minutes.

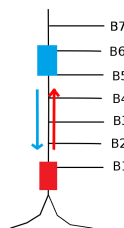


FIGURE 1 – Un exemple d'autoblocage entre deux AGV

### 1.1 Travaux dans la littérature

Lors de la conception d'un système de véhicule guidé automatisé, il est nécessaire de faire un bon routage sans conflit des AGV et de bien attribuer les différentes missions. La conception du système de contrôle de la flotte d'AGV a fait l'objet de nombreuses études universitaires. De nombreuses solutions sont basées sur la théorie de l'ordonnancement ([1] [2]) où les auteurs fusionnent des techniques d'ordonnancement prédictif et des algorithmes exécutés en ligne afin de tenir compte des pannes ou des retards qui peuvent se produire dans le système.

Une autre approche est basée sur la théorie de la supervision, qui est basée sur l'utilisation de modèles états-transitions, tel que les automates finis. La théorie de la supervision a été développée depuis les travaux fondateurs il y a 25 ans de Ramadge et Wonham ([3] [4], c'est devenu un paradigme de base pour le contrôle de systèmes à événements discrets. Elle permet essentiellement de synthétiser un superviseur pour éviter les conflits.

La théorie de la supervision est un atout majeur. Elle est maximalelement permissive, ce qui donne un maximum de degrés de liberté tout en garantissant qu'il n'y est aucun conflit. Cette permissivité permet au système d'avoir une grande flexibilité. Cette approche a été proposée dans [5], où le principal objectif est d'établir un routage minimisant la consommation énergétique des AGV. Le principal problème est l'explosion combinatoire qui dépend du nombre d'AGV dans le système. En effet, dans [5], il est impossible de générer un superviseur pour quatre AGV ou plus. Le superviseur doit prendre en considération toutes les combinaisons de déplacements possible des différents AGV sur un même circuit, il est alors facile d'imaginer l'explosion combinatoire quand on atteint un trop grand nombre d'AGV.

## 1.2 Motivations

Dans le monde industriel, un circuit est conçu pour définir les voies de circulation des véhicules autoguidés. Ces voies permettent d'accéder à différentes zones de stockage comme on peut le voir dans la figure 2 qui représente une zone du circuit global du système. On s'intéressera ici uniquement à cette gestion de zone de stockage car c'est ici que la majorité des conflits sont présent. Les noeuds (représentés par des lettres de l'alphabet) représentent un début ou une fin d'un tronçon. Il y a quatre bases de travail ( $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  et  $B4$ ) qui représente l'endroit où un AGV va venir prendre ou déposer différentes charges.

Dans le milieu industriel (Figure 2), nous pouvons étendre ce modèle à plus de vingt bases de travail. Il devient alors très difficile de gérer le trafic en temps réel en évitant tout conflit entre les AGV. Les situations d'autoblocages sont alors très fréquente et il devient nécessaire d'éviter tout conflit tout en gardant un rythme de production acceptable. Pour s'assurer qu'aucune situation de blocage n'apparaisse, cette zone est défini comme une zone d'exclusion mutuelle qui empêche alors tout AGV d'entrer dans la zone si un AGV est déjà présent. Cela permet de garantir aucun conflit entre les AGV. Cependant, ce n'est pas satisfaisant (en terme de production) et il faut alors faire un choix : soit nous garantissons aucun blocage et la production se déroule en continue mais moins intensive, soit on augmente le nombre d'AGV autorisés dans la zone, ce qui permet d'augmenter la production, mais en prenant le risque d'apparition de conflits (arrêt de production).

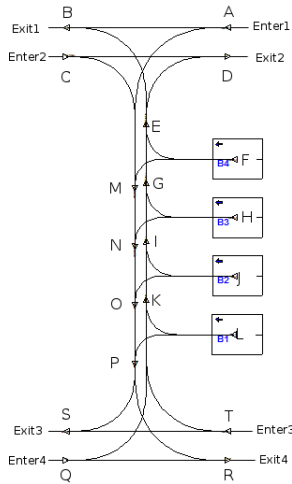


FIGURE 2 – Un exemple d'une zone de stockage en milieu industriel.

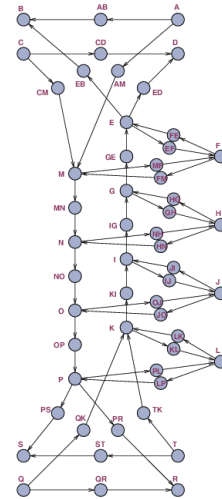


FIGURE 3 – Modélisation sous forme d'automate

En utilisant la théorie de la supervision de Ramadge et Wonham, le superviseur généré garantit qu'aucun conflit n'apparaisse tout en étant le plus permissif possible, ce qui permet d'avoir un rythme de production le plus grand possible. Cependant en appliquant une approche standard de la théorie de la supervision, nous pouvons avoir un temps de calcul beaucoup trop grand pour un système temps réel et/ou une explosion combinatoire en fonction du nombre d'AGV, ce qui la rends inapplicable en milieu

industriel. C'est pourquoi nous proposons une approche compositionnelle afin de générer le superviseur dans un temps raisonnable et pour un plus grand nombre d'AGV.

## 2 La théorie de la supervision

Dans cette section nous allons voir comment est généré un superviseur en utilisant la théorie de la supervision et les automates finis. Pour représenter le système on utilise les automates finis.

### 2.1 Modélisation

Un modèle représentant la circulation des véhicules sur le circuit doit être conçu. Chaque AGV, qui est un processus autonome dans le processus global, est représenté par un automate. Un circuit est divisé en tronçons. Chaque fois qu'un AGV se déplace sur un nouveau tronçon ou arrive à la fin du tronçon, implique un changement d'état dans le système. Le modèle utilisé pour représenter un AGV sur la zone décrite en Figure 2 est donné en Figure 3. Un état modélise soit "je suis arrivé à la fin du tronçon", soit "je suis actuellement sur le tronçon". Par exemple, si un AGV est dans l'état  $CM$ , l'AGV se déplace sur le tronçon compris entre les noeuds  $C$  et  $M$ , dans le sens  $C$  vers  $M$ . Pour chaque AGV, leurs transitions sont indépendantes, il est nécessaire de les étiqueter différemment en ajoutant le numéro de l'AGV en question.

### 2.2 Approche standard

Le superviseur va agir sur un système (modélisé par un automate  $M$ ) en interdisant l'occurrence de certains événements à l'aide de spécifications. Les spécifications définissent quel est le comportement attendu de notre système. Elles peuvent être définies sous la forme d'un automate modélisant ce comportement ou comme une liste d'états que l'on ne souhaite jamais atteindre. Par exemple, l'état qui représente deux AGV se trouvant à la même position sur le circuit est un état interdit car cela signifie qu'il y a une collision entre nos deux AGV. Enfin, il faut que notre superviseur garantisse le non blocage, ce qui assure au système supervisé de toujours pouvoir atteindre à tout moment notre objectif final (l'état final du superviseur).

Pour générer l'automate  $M$  qui représente le système (toutes les combinaisons de déplacements possible entre les AGV), il faut effectuer le produit entre les automates représentant le comportement de chaque AGV. Supposons un système à trois AGV ayant chacun une mission dans la zone décrite en Figure 2. Étant donné que chaque AGV se déplace sur le même circuit, on modélisera dans un premier temps l'automate d'un AGV qui servira de template. Chaque AGV entrant dans cette zone utilisera ce template pour représenter l'ensemble de ces déplacements possible. On notera  $G_i$  l'automate représentant l'AGV $_i$ . Ainsi on a  $M = G_1 \times G_2 \times G_3$ . Considérons un système à  $n$  AGV alors l'automate  $M$  a  $|Q|^n$  états où  $|Q|$  représente le nombre d'états de  $M$  et  $n \times |Q|^{n-1} \times |\delta|$  où  $|\delta|$  représente le nombre de transitions de  $M$ . On voit alors facilement la complexité exponentielle qui dépend du nombre d'AGV et qui nous empêche de calculer un superviseur au-delà de quatre AGV.

Dans notre cas la spécification est sous forme d'une liste d'états interdits (état de collision), on supprime ces états et le problème de synthèse se ramène à un problème d'atteignabilité par rapport à l'état initial et de coatteignabilité par rapport à l'état final ([6]). En d'autres mots, on doit retirer de l'automate final (le superviseur) tous les états menant uniquement à un état interdit et les états n'étant pas accessibles depuis l'état initial (des déplacements devenu impossible suite à la suppression des états interdits). L'automate modélisant le superviseur calculé est un sous automate de  $M$ .

### 2.3 Approche compositionnelle

L'approche compositionnelle que l'on propose consiste à générer des superviseurs intermédiaires pour arriver au calcul du superviseur final. Considérons un système à  $n$  AGV, on synthétise en premier lieu le superviseur entre les deux premiers AGV que l'on notera  $S_1 = S(G_1 \times G_2)$ . On va ensuite composer ce superviseur intermédiaire ( $S_1$ ) avec l'AGV $_{i+1}$  pour générer le superviseur pour les  $i + 1$  premiers AGV  $S(S_1 \times G_{i+1})$  et ainsi de suite jusqu'à arriver à l'AGV $_n$ . De cette façon, on ne calcule plus  $M$  qui représente l'ensemble du système et on réduit l'explosion combinatoire. En effet, les superviseurs intermédiaires vont supprimer tous les états interdits pour les  $i^{er}$  AGV considérés et réduire le futur produit avec l'AGV $_{i+1}$ . On illustre cette méthode en Figure 4. On note l'opérateur  $S$  comme l'opération de synthèse de superviseur.

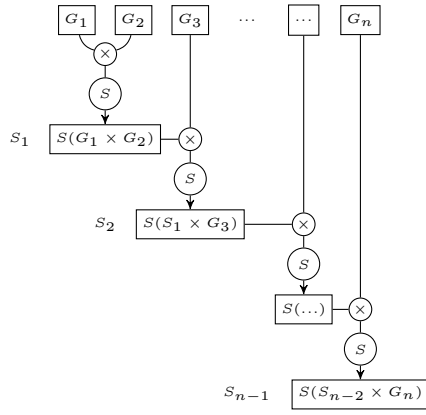


FIGURE 4 – L'approche compositionnelle

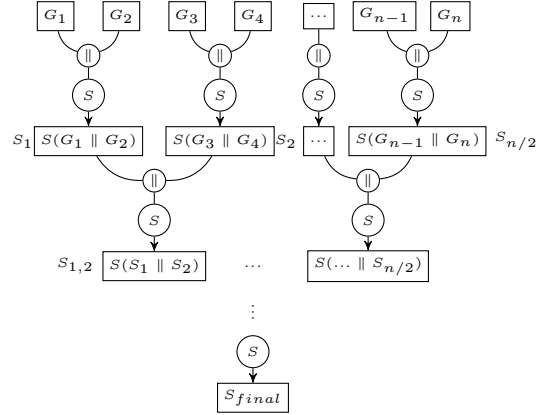


FIGURE 5 – Approche compositionnelle alternative

Avec cette approche on peut composer les automates de chaque AGV dans l'ordre que l'on souhaite. De plus, si un nouvel AGV arrive dans la zone après que d'autres soient déjà présent, il n'est pas nécessaire de recalculer le superviseur depuis le début. En effet, si l'AGV<sub>n+1</sub> arrive, nous sommes dans un état  $q$  du superviseur actuel, alors le nouveau superviseur est synthétiser entre la partie accessible du superviseur actuel (où  $q$  devient l'état initial du superviseur) et l'automate de l'AGV<sub>n+1</sub>. Cette propriété est essentielle pour un système en temps réel, car cela permet un temps de calcul raisonnable en supposant que tous les AGV n'arrivent pas en même temps en entrée de zone, ce qui est la plupart du temps le cas en milieu industriel. Cette approche permet de concevoir un superviseur pour un grand nombre d'AGV alors qu'avec une approche standard on ne peut pas modéliser un tel superviseur pour quatre AGV ou plus.

Cette propriété de compositionnalité a été prouvée dans un article en cours de soumission pour la conférence DCDS 2013 et n'est pas présenté ici. Pour optimiser le temps de calcul pour des AGV arrivant au même moment dans une zone, il suffit de synthétiser le maximum de superviseur intermédiaires entre deux AGV et ensuite synthétiser le superviseur final à partir des superviseur intermédiaires. On peut voir cette approche comme un arbre parfaitement équilibré et décrit en Figure 5.

### 3 Conclusion

Pour conclure, nous avons obtenu des résultats très satisfaisant, au delà-de nos espérances ce qui permet d'envisager de pouvoir implanter cette approche directement chez BA Systèmes (notre partenaire industriel qui finance cette thèse). Pour la suite de notre travail, on ajoutera des notions de poids dans le superviseur pour pouvoir établir en temps réel le meilleur chemin à prendre pour les AGV suivant différents critères tel que l'énergie ou le temps de parcours par exemple.

### Références

- [1] L. Breton, S. Maza, and P. Castagna. A multi-agent based conflict-free routing approach of bi-directional automated guided vehicles. In *American Control Conference*, Juillet 2006.
- [2] S. Maza. *Analyse du comportement d'un systeme de transport par chariot bidirectionnels en vue de sa commande*. PhD thesis, Université de Nantes, 2003.
- [3] P. J. Ramadge and W. M. Wonham. Supervisory control of a class of discrete event process. *SIAM J. Control and Optimization*, 25(1) :206–230, January 1987.
- [4] P. J. Ramadge and W. M. Wonham. On the supremal controllable sublanguage of a given language. *SIAM J. Control and Optimization*, 25(3) :637–659, May 1987.
- [5] Yoann Arnaud, Jose E.R. Cury, J-J Loiseau, and Claude Martinez. Pilotage sûr et optimal d'une flotte de véhicules autoguidés. In *3èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS JD-JN-MACS 2009, Angers : France*, 2009.
- [6] Christos G. Cassandras and Stephane Lafortune. *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2006.