

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VI

SPECIALITE : INFORMATIQUE

Présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Université Paris VI

Par

Karim ZEGHAL

Titre de la thèse

**VERS UNE THEORIE DE LA COORDINATION D'ACTIONS
APPLICATION A LA NAVIGATION AERIENNE**

Soutenue le 12 Décembre 1994 devant le jury composé de :

Frédéric CHUPEAU, *Chef de Division CENA*

Jean ERCEAU, *Chef de Division ONERA*

Pascal ESTRAILLIER, *Professeur PARIS VI*

Jacques FERBER, *Professeur PARIS VI*

Christian LAUGIER, *Directeur de Recherches INRIA*

Jean-Paul LAUMOND, *Directeur de Recherches CNRS*

Georges MAIGNAN, *Directeur du Centre expérimental EUROCONTROL*

Jean-Pierre MAREC, *Directeur des Applications aéronautiques ONERA*

Président

Directeur

Rapporteur

Rapporteur

RESUME

Ce travail, qui se situe au carrefour de l'Intelligence artificielle distribuée et de la Robotique, s'attaque au problème de la coordination d'actions entre agents mobiles. Il y a un problème de coordination dès lors que les agents doivent s'éviter (e.g. navigation aérienne) ou atteindre une configuration commune (e.g. formation de patrouille d'avions sans pilote, déplacement d'un objet par plusieurs bras manipulateurs). La difficulté essentielle provient des *interdépendances* entre les actions des agents. Il faut donc proposer une méthode permettant de les résoudre. La difficulté supplémentaire est que cette méthode doit pouvoir gérer les interdépendances dans des populations dynamiques, que celles-ci soient denses ou au contraire dispersées.

Nous avons abordé ce problème sous l'angle de l'*interaction*, en nous appuyant sur le principe des champs de potentiels. Notre méthode consiste à exprimer la fonction de coordination comme la composition d'une fonction *générique*, à base de *forces symétriques*, et d'une fonction *spécifique* au problème à résoudre. Nous avons ainsi défini des lois de couplages entre actions, qui sont essentiellement locales, et projeté ces couplages sur chacun des agents.

Les principes développés définissent un mécanisme de résolution collective des problèmes de *navigation multi-agents*, dont la particularité est de permettre aux agents de déterminer leurs propres actions simultanément et de façon indépendante. Ceci constitue l'apport de notre travail dans le domaine de l'Intelligence artificielle distribuée. Ces principes définissent aussi un mécanisme décentralisé de coordination de mouvements, pouvant gérer en temps réel un nombre important de mobiles. C'est l'apport de notre travail pour la Robotique. Cette approche est cependant essentiellement heuristique, et s'il est possible d'exprimer des stratégies locales, le respect de critères globaux semble en revanche difficile à garantir. Mais cette difficulté n'a pas empêché ce travail d'être appliqué au problème de la navigation aérienne. L'intégration du mécanisme de détection et de résolution de conflits dans l'environnement du contrôle a été envisagé sous trois formes : système embarqué de maintien de séparation, système centralisé de planification de trajectoires, ou encore système sol - bord. Les tests effectués constituent une preuve de faisabilité.

MOTS-CLES

Intelligence artificielle distribuée — Robotique — Coordination de mouvement — Navigation multi-agents — Techniques de champs de forces — Contrôle du trafic aérien

ABSTRACT

This work addresses the problem of action coordination for mobile agents, and therefore, may be related to the fields of Distributed Artificial Intelligence and Robotics. This problem of coordination occurs when several agents have to avoid each other (e.g. collision avoidance in air traffic) or reach a shared configuration (e.g. air patrol, object grasping by harm manipulators). The main difficulty relies on the dependencies between the agents' actions. A resolution method must be provided. And this raises the second difficulty : this method must face dynamic populations that are either dense or widespread.

We have tackled this problem under the *interaction* point of view, by using potential field methods developed in Robotics. The coordination function has been defined as the combination of a *generic* function based upon *symmetrical forces*, and a *specific* function which depends on the particular problem to be solved. We have therefore defined coupling relations between actions, and projected these relations onto each agent.

The principles developed provide a mechanism of collective resolution for *multi-agent navigation* problems, allowing the agents to determine simultaneously and independently their own actions. This is our contribution for the domain of Distributed Artificial Intelligence. These principles also define a decentralized motion coordination which is capable to cope with a high number of mobiles. This is our contribution for the domain of Robotics. However, this approach is heuristical, and therefore, although local strategies can be easily introduced, the achievement of global strategies cannot be guaranteed. In relation to the air traffic application, the implementation of the conflict detection and resolution mechanism has been envisioned as an on-board collision avoidance system, a centralized trajectories planning, or a ground - board system. The feasibility has been proved by the test results.

KEYWORDS

Distributed artificial intelligence — Robotics — Motion coordination — Multi-agent navigation — Force fields techniques — Air traffic control

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
Le problème.....	1
Points critiques.....	2
Principe de l'approche.....	3
Plan de la thèse	4
ETAT DE L'ART	7
Robotique.....	7
Intelligence artificielle distribuée	9
Navigation aérienne	10
PARTIE I : ACTION INDIVIDUELLE DE NAVIGATION	13
1. Introduction	13
2. Problématique : génération d'actions individuelles.....	14
3. Forces répulsive et attractive : une représentation d'action d'évitement émergente.....	17
3.1. Rappel sur les potentiels attractifs et répulsifs	17
3.2. Problème des minimas locaux	19
3.3. Condition d'émergence de l'action d'évitement.....	22
3.4. Comment forcer l'apparition de l'action d'évitement ?	25
4. Force glissante : une représentation d'action d'évitement	26
4.1. Définition.....	26
4.2. Quelques propriétés du champ glissant.....	30

4.3. Forces de glissement particulières	33
4.3.1. Optimisation locale	33
4.3.2. Respect de contraintes.....	34
4.3.3. Combinaison des deux modes d'évitement.....	36
4.3.4. Contraintes multiples	37
4.3.4.1. Problème du degré de contrainte minoré.....	38
4.3.4.2. Cas particulier : vecteur de contrainte nul	39
4.3.4.3. Cas particulier : somme partielle nulle et degrés de contrainte maximaux.....	40
4.4. Résultats expérimentaux	41
4.4.1. Obstacle convexe	41
4.4.2. Obstacle rectiligne	42
4.4.3. Obstacle concave	44
4.4.4. Obstacles multiples	49
5. Combinaison des forces : le contrôle sur les actions.....	53
5.1. Complétude des actions	53
5.2. Types et sous types d'actions	53
5.3. Intérêt du contrôle	55
5.4. Un contrôle concurrent et progressif.....	57
6. Résumé	59
7. Conclusion.....	60

PARTIE II : ACTION COLLECTIVE DE NAVIGATION..... 63

1. Introduction	63
2. Problématique : génération d'actions collectives	64
2.1. Formulation.....	64
2.2. Critères de génération	66
2.2.1. Approche classique : introduction de priorités.....	67
2.2.2. Autre approche : décomposition de l'action	68
2.2.3. Vers un découplage maximal ?.....	69
2.3. Principe de l'approche « interactionniste »	69
3. Forces couplées : une représentation des interactions.....	70
3.1. Définition des fonctions d'interaction	71
3.2. Types de relations et existence des actions.....	75
3.2.1. Paramètres conditionnant l'existence des actions.....	75
3.2.1.1. Relation simple versus relation double	75
3.2.1.2. Homogène versus hétérogène	75
3.2.1.3. Situation coopérative versus situation conflictuelle.....	76

3.2.2. Double dépendance homogène	76
3.2.3. Interaction homogène.....	77
3.2.3.1. Interaction de fuite ou de convergence	79
3.2.3.2. Interaction d'évitement	80
3.2.3.3. « Reformulation » de la troisième loi de Newton	81
3.2.2.4. Condition d'application.....	82
4. Exemple de forces couplées particulières.....	82
4.1. Environnement faiblement contraint.....	83
4.1.1. Critère d'efficacité	83
4.1.2. Définition du vecteur de projection	84
4.1.2.1. Optimisation locale	84
4.1.2.2. Respect des contraintes	85
4.1.3. Retour vers la fonction de coordination	86
4.1.4. Simulations.....	86
4.2. Environnement fortement contraint.....	91
4.3. Agents hétérogènes	94
5. Vers une extension de la notion d'interaction	95
6. Conclusion.....	98

PARTIE III : APPLICATION A LA NAVIGATION AERIENNE..... 99

1. Introduction	99
2. Description des trois systèmes	100
2.1. Système embarqué.....	101
2.2. Système d'aide au contrôleur	103
2.3. Système double « intermédiaire ».....	105
3. Processus individuel réactif.....	109
3.1. Détection de conflit.....	109
3.1.1. Paramètres significatifs.....	109
3.1.2. Risque de collision	113
3.1.3. Volume de protection.....	113
3.1.4. Volume de réaction	114
3.2. Résolution de conflit avec un intrus passif	116
3.2.1. Géométrie du conflit	116
3.2.2. Urgence du conflit.....	117
3.2.3. Contraintes cinématiques	118
3.3. Résolution de conflit avec un intrus coopératif	121
3.4. Comportement résultant.....	123
4. Processus collectif planificateur	123

4.1. Simulation	123
4.1.1. Sélection des appareils concernés	124
4.1.2. Début d'activation.....	126
4.1.3. Fin d'activation	128
4.2. Suivi d'exécution	128
4.3. Lissage de trajectoire	128
4.3.1. Principe du lissage	129
4.3.1.1. Ecart par rapport à une direction de référence	129
4.3.1.2. Surface définie par la trajectoire	130
4.3.1.3. Processus de lissage	131
4.3.2. Définition du seuil.....	132
5. Gestion des incertitudes	134
5.1. Incertitude de perception.....	135
5.2. Incertitude d'exécution.....	136
5.2.1. Erreur technique de vol	136
5.2.2. Propagation de l'erreur.....	138
6. Résultats expérimentaux.....	139
7. Conclusion.....	142
CONCLUSION	143
REFERENCES.....	147