

Fusion de données multi-capteurs à l'aide d'un réseau bayésien pour l'estimation d'état d'un véhicule

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le : 7 MAI 2010

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Nancy 2
(spécialité informatique)

par

Cherif Smaili

Composition du jury

Rapporteurs : Philippe Leray, Professeur des Universités, Nantes.
Roland Chapuis, Professeur LASMEA, Clermont-Ferrand.

Examineurs : Abder Koukam, Professeur, Belfort-Montbéliard.
Anne Boyer, Professeur des Universités, Nancy2.
Philippe Bonnifait, Professeur UTC, Compiègne.
Francois Charpillat, Directeur de recherche, INRIA Nancy.
Maan El Badaoui El Najjar, Maître de conférence, Université Lille1.

Je dédie cette thèse à mes chers parents et à toute ma famille

Remerciements

Je remercie ILLAHI, sans son aide je ne serais pas là.

Je tiens à remercier les rapporteurs M. Roland Chapuis et M. Philippe Leray d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse. Mes remerciements vont également aux autres membres du Jury : Mme Anne Boyer, M. Philippe Bonnifait et M. Abder Koukam.

Un remerciement particulier à M. Phillippe Bonnifait et le laboratoire HeuDiaSyc pour avoir mis à notre disposition les données réelles utilisées dans le cadre de cette thèse. Un grand merci à Anne Boyer pour sa patience et sa disponibilité dont elle a su faire preuve pour mon DRT et qui me fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Avec une grande reconnaissance, je remercie mon directeur de thèse François Charpillet. Son unique optimisme m'a entièrement transformé, soutenu et réconforté durant les moments les plus difficiles de ces années. Un point très important est qu'en travaillant avec François on ne sent en aucun moment, qu'il est le Big Boss de l'équipe MAIA. En un mot : un grand merci à toi François.

Je voudrais remercier mon co-encadrant Maan El Badaoui El Najjar. Je le remercie pour sa disponibilité, sa rigueur et notamment son savoir faire. Son enthousiasme, sa positivité, sa détermination et sa patience m'ont donné le goût de la recherche. Bien que les 450 kilomètres qui nous séparent (Lille-Nancy), je me sentais toutefois aussi près de Lille que de Nancy. Les multiples voyages et les longues conversations téléphoniques ont atténué cette longue distance. Au-delà de ses qualités scientifiques, ce sont surtout ses qualités humaines que je voudrais souligner. Le proverbe italien dit : trouver un ami, trouver un trésor. En un mot : merci à toi mon ami Maan.

Je dois un grand merci à Cédric Rose pour nos longues discussions, sa disponibilité malgré ses projets et surtout sa connaissance encyclopédique sur les réseaux Bayésiens. Ses qualités humaines sont à souligner. Merci Cédric ou comme j'aime bien t'appelé : Murphy de France et bon courage pour ta vie professionnelle.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon frère Kamel Smaili qui m'a encouragé de près et de loin tout au long de mon DRT et ma thèse et qui est la cause de ma présence en France.

Avant d'oublier, un grand merci pour mes amis d'enfance et camarades de classe qui n'ont jamais hésité à me téléphoner pour prendre de mes nouvelles.

Un grand merci à mes deux coéquipiers de karaté Frank et François qui ont pu lire cette thèse une dernière fois. Je garderai un formidable souvenir de nos séanes du Lundi et du Mercredi. Enfin et surtout, je ne saurais terminer ces quelques lignes sans une pensée pour mes parents,

sans eux je n'aurais jamais pu arriver à ce stade. Sans oublier mes frères et soeur : Kamel, Youcef, Lila, Samir et Fouad et ma future femme.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des figures	xi
Liste des tableaux	xv
Introduction	1
1 Contexte du travail	1
2 Problématique scientifique de la localisation	2
3 Contributions	3
4 Organisation du manuscrit	4
1 La localisation d'un véhicule terrestre	7
1.1 Introduction	7
1.2 Les capteurs	8
1.2.1 Le GPS	8
1.2.2 Les codeurs incrémentaux	9
1.2.3 Les télémètres	11
1.2.4 Les gyroscopes	12
1.2.5 Les caméras	12
1.2.6 Autres sources d'informations pour la localisation	14
1.3 La fusion de données	14
1.3.1 Introduction	14
1.3.2 Approches classiques pour la fusion de données	15
1.3.2.1 Les modèles de Markov cachés	15
1.3.2.2 Les modèles graphiques probabilistes	15
1.3.2.3 Filtre de Kalman	16
1.3.2.4 Filtre de Kalman étendu	17
1.3.2.5 Filtrage particulière	18
1.4 Méthodes et algorithmes de Localisation	23

1.4.1	Localisation sans carte	23
1.4.1.1	Localisation relative	23
1.4.1.2	Odométrie	23
1.4.1.3	Navigation inertielle	23
1.4.1.4	La vision	24
1.4.1.5	Localisation absolue	24
1.4.1.6	Localisation en utilisant des amers	24
1.4.1.7	Localisation en utilisant des cartes	25
1.4.2	Map-Matching : localisation d'un véhicule avec une carte routière	25
1.4.2.1	Approches géométriques	26
1.4.2.2	Approches topologiques	28
1.4.2.3	Approches avancées du Map-Matching	29
1.5	Conclusion	31
2	Les réseaux bayésiens	35
2.1	Introduction	35
2.2	Connaissance de base sur la théorie de probabilité	35
2.2.1	Distribution de probabilités	36
2.2.2	La probabilité conditionnelle	36
2.2.3	Dépendance et indépendance des variables	37
2.2.4	Théorème de Bayes	38
2.3	Notions de base sur la théorie des graphes	38
2.3.1	Introduction	38
2.3.2	Graphes triangulés	40
2.3.3	Algorithme de triangulation	41
2.3.4	Identification des cliques	44
2.3.5	Algorithme d'identification des cliques	45
2.3.6	Chaîne de cliques	45
2.3.7	Graphe et arbre de jonction	46
2.4	Les modèles graphiques probabilistes	48
2.4.1	Introduction	48
2.4.2	Représentation de la distribution de probabilités par un réseau bayésien	49
2.4.2.1	Factorisation de la <i>JPD</i> dans un arbre de jonction	50
2.4.3	Exemple de transformation d'un graphe en un arbre de jonction	51
2.5	Moteur d'inférence	52
2.5.1	Introduction	52
2.5.2	Phase d'initialisation de l'arbre de jonction	53

2.5.3	Calcul local sur l'arbre de jonction	54
2.5.4	Introduire une observation dans un arbre de jonction	56
2.6	Réseau bayésien à variables continues	57
2.6.1	Distribution normale	58
2.6.2	Loi de Gauss linéaire	58
2.6.3	Représentation des potentiels dans le cas continu	58
2.6.4	Convertir la Loi de Gauss linéaire sous forme canonique	59
2.6.5	Opérations sur la forme canonique	60
2.6.6	Inférence dans un réseau bayésien à variables continues	61
2.7	Réseaux bayésiens hybrides	61
2.7.1	Introduction	61
2.7.2	Distribution de probabilités dans le cas hybride	62
2.7.3	Marginalisation dans le cas hybride	62
2.7.4	Arbre de jonction avec une racine forte	62
2.7.5	Condition d'existence d'une racine forte	63
2.8	Réseaux bayésiens dynamiques	64
2.8.1	Introduction	64
2.8.2	Inférence	65
2.8.3	Inférence dans le Switching Kalman Filter	67
2.8.4	Techniques de réduction du nombre de gaussiennes	68
2.9	Conclusion	69
3	Approche développée	71
3.1	Introduction	71
3.2	Position du problème du map-matching	72
3.2.1	Sources d'information utilisées pour la localisation d'un véhicule	72
3.2.1.1	Estimation donnée par l'odométrie	72
3.2.1.2	Correction de l'estimation donnée par l'odométrie par un GPS	72
3.2.1.3	La cartographie	73
3.2.2	Modèle d'évolution d'un robot	75
3.2.3	Difficulté à manipuler les systèmes non linéaires	76
3.2.3.1	Filtre de Kalman	77
3.2.3.2	Introduction aux modèles chaînés	78
3.2.3.3	Linéarisation exacte	79
3.2.3.4	Modèle unicycle et linéarisation exacte	80
3.2.3.5	Modèle cinématique bruité	83
3.3	Map-matching	84

3.3.1	Nécessité de l'aspect multi-hypothèses	84
3.3.2	Gestion de plusieurs segments	85
3.3.3	Réseau bayésien et map-matching	86
3.3.3.1	Sélection et attribution des probabilités aux segments	87
3.3.3.2	Modèle de réseau bayésien pour le map-matching	88
3.3.3.3	Exemple de spécification numérique des variables	89
3.3.3.4	Construction de l'arbre de jonction	90
3.3.3.5	Initialisation de l'arbre de jonction	90
3.3.3.6	Mise à jour du réseau par les observations <i>GPS</i> et <i>Carto</i>	91
3.3.4	Synoptique de la méthode basée sur les réseaux bayésiens	92
3.3.5	Exemple	93
3.3.6	Aspect temporel du réseau	94
3.4	Convoi de véhicule	96
3.4.1	Introduction	96
3.4.2	Problématique étudiée	96
3.4.3	Localisation absolue et relative	96
3.4.3.1	La localisation absolue	97
3.4.3.2	La localisation relative	98
3.4.4	Capteurs utilisés sur chaque véhicule du convoi	98
3.4.5	Réseau bayésien et train de véhicule	98
3.4.5.1	Modèle de réseau pour la localisation d'un train de véhicules	99
3.4.5.2	Problématique du modèle proposé	101
3.4.5.3	Nouveau modèle pour la localisation d'un train de véhicule	101
3.4.6	Commandes proportionnelles	102
3.5	Conclusion	104
4	Résultats et expériences	107
4.1	Introduction	107
4.2	Résultats expérimentaux de la localisation d'un véhicule sur une carte	107
4.2.1	Situations d'ambiguïtés	107
4.2.2	Expériences	108
4.2.2.1	Expérience 1 : localisation sans utilisation du GPS	108
4.2.2.2	Expérience 2 : situation d'ambiguïté dans le cas de routes parallèles	110
4.2.2.3	Expérience 3 : situation d'ambiguïté dans le cas d'une jonction de route	112
4.3	Résultats expérimentaux de la localisation d'un convoi de véhicule	113

4.3.1	Description des véhicules	113
4.3.2	Le récepteur GPS	114
4.3.3	Trajectoires des véhicules suiveurs	114
4.3.4	Inter-distance entre les véhicules	118
4.4	Transformation du modèle cinématique d'un véhicule en modèles chaînés	120
4.4.1	Localisation d'un véhicule en utilisant le modèle chaîné	120
4.4.2	Représentation d'un filtre de Kalman par un réseau bayésien	121
4.4.3	Comparaison entre un filtre de Kalman étendu et le modèle chaîné	122
4.5	Conclusion	124
	Conclusion et perspectives	127
	Bibliographie	131