

Prototype expérimental pour l'identification de sources chauffantes se déplaçant sur une surface

Thanh Phong TRAN¹, Alban VERGNAUD¹, Laetitia PEREZ²

¹LARIS, Université d'Angers

62 avenue notre dame du lac 49000 Angers France

²LTN-UMR CNRS 6607, Université de Nantes

La Chantrerie, Rue Christian Pauc, BP50609 44306 Nantes cedex 03 France

* (auteur correspondant : thanhphong.tran@etud.univ-angers.fr)

Résumé Le travail proposé dans cette étude s'articule au sein d'un projet visant à déplacer un ensemble de capteurs mobiles de manière optimale afin d'identifier la trajectoire et la puissance d'une (ou plusieurs) sources évoluant sur une plaque métallique fine. Cette expérimentation actuellement en cours de conception et de réalisation a pour objet de tester la validité de différentes stratégies de déplacements de capteurs. L'objectif principal est d'identifier en ligne le couple puissance & trajectoire de chaque source via une méthode de régularisation itérative basée sur la méthode du gradient conjugué. Cette communication vise à présenter la conception et la réalisation du dispositif expérimental. Les sources chauffantes sont embarquées sur des robots mobiles (Khepera III) qui évoluent sur une plaque d'aluminium fine de 4m² et d'épaisseur 2mm. La puissance des sources de chaleur est régulée de manière à décrire différents profils d'évolution. Sur cette même plaque, plusieurs robots mobiles sont équipés de pyromètres afin de mesurer la température de la plaque de manière quasi ponctuelle. Les températures mesurées ainsi que la position des points de mesures sont transmises à un ordinateur central via une technologie sans fil (WIFI). Les problèmes inverses pour l'identification sont ensuite résolus quasi en ligne et simultanément, les prochaines trajectoires des pyromètres sont estimées et envoyées aux robots observateurs qui se déplacent alors vers leurs prochaines positions. La position absolue des robots étant nécessaire au bon fonctionnement du système (robustesse de la procédure d'identification), nous utilisons en complément de la mesure odométrique un système de localisation global par caméra. Cette dernière est positionnée au-dessus de la plaque ; les différentes mesures de position obtenues par vision sont synchronisées avec celles envoyées par les robots observateurs pour une éventuelle correction. Le dispositif présenté dans cette communication est schématisé Fig. 1.

Nomenclature

Symboles généraux

c	Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
e	Épaisseur, m
t	Temps, s
x	Variable d'espace, m
y	Variable d'espace, m
h	Coefficient transfert thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$

Symboles grecs

θ	Température, K
λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
ϕ_{chauf}	Densité de flux, W/m^2
α	Orientation des robots, rad
ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$

1. Introduction

Dans le cadre de l'étude des problèmes inverses de conduction de la chaleur, il est usuel de chercher à minimiser un critère quadratique décrivant l'erreur de prédiction entre les observations et les températures prédites par un modèle mathématique valide [1]. De tels problèmes sont en général mal-posés du fait de la condition de stabilité [2] qui n'est pas satisfaite (d'importantes incertitudes sur le paramètre inconnu sont induites par de petites variations dans les mesures). Les méthodes permettant l'obtention de solutions stables sont dites de régularisation [3]. La méthode de régularisation itérative basée sur un algorithme de descente de type gradient conjugué [4] est d'une efficacité reconnue en génie thermique [5]. Une illustration de son effet régularisant est proposée dans [6] où il est montré que le nombre d'itération peut être considéré comme le paramètre de régularisation de ces méthodes, assurant que l'algorithme se comporte comme un filtre passe-bas capable de rejeter les perturbations des mesures qui sont à haute fréquence. Pour des procédés complexes (modèles non linéaires dans des géométries tri dimensionnelles faisant intervenir de très nombreux paramètres [7,8]), le temps de calcul requis pour l'identification est rédhibitoire pour envisager un diagnostic en ligne. Il est toutefois possible d'envisager une adaptation quasi en ligne de la méthode régularisation itérative du gradient conjugué (une situation numérique est étudiée dans [9]). Afin d'illustrer l'intérêt et la mise en œuvre pratique de cette approche, un dispositif expérimental a été conçu pour l'identification de la trajectoire et de la puissance d'une (ou plusieurs) sources évoluant sur une plaque métallique fine. Cette expérimentation, actuellement en cours de conception et de réalisation, qui a pour objet de tester la validité de différentes stratégies de déplacements de capteurs est décrite ci-après. La problématique d'identification quasi en-ligne est abordée dans une communication conjointe [10].

2. Dispositif expérimental

2.1. Description globale du système

Le dispositif a pour objet de valider une méthode d'identification quasi en ligne pour un problème inverse de conduction de la chaleur. Aussi, ce banc n'est pas dédié à un procédé thermique spécifique. Les sources chauffantes sont embarquées sur des robots mobiles qui évoluent sur une plaque d'aluminium fine d'environ $4m^2$ et d'épaisseur $2mm$. La puissance des sources de chaleur est régulée de manière à décrire différents profils d'évolution. Ces densités de flux pourront être continues ou non. La méthode d'identification quasi en ligne présentée dans [10] propose une stratégie de choix de capteurs ponctuels. Il ne s'agit pas ici de traiter des cartographies obtenues à l'aide de caméras infra-rouges. En effet, de manière plus générale, la problématique principale vise à maîtriser le déplacement d'une meute de capteurs ponctuels dans un environnement de grande dimension (véhicules détectant des polluants se diffusant dans un milieu urbain contraint). Sur cette même plaque, plusieurs

robots mobiles sont équipés de pyromètres afin de mesurer la température de la plaque de manière quasi ponctuelle. Les températures mesurées ainsi que la position des points de mesures sont transmises à un ordinateur central via une technologie sans-fil (WiFi). Les problèmes inverses pour l'identification seront ensuite résolus quasi en ligne. Les trajectoires des pyromètres sont estimées tout au long du procédé et envoyées aux robots observateurs qui se déplacent alors vers leurs prochaines positions [11]. La position absolue des robots étant nécessaire au bon fonctionnement du système (robustesse de la procédure d'identification), un système de localisation globale par vision est utilisé (en complément de la mesure odométrique). Une caméra est positionnée au-dessus de la plaque ; les différentes mesures de position obtenues par vision sont synchronisées avec celles envoyées par les robots observateurs pour une éventuelle correction. Le dispositif est schématisé figure 1.

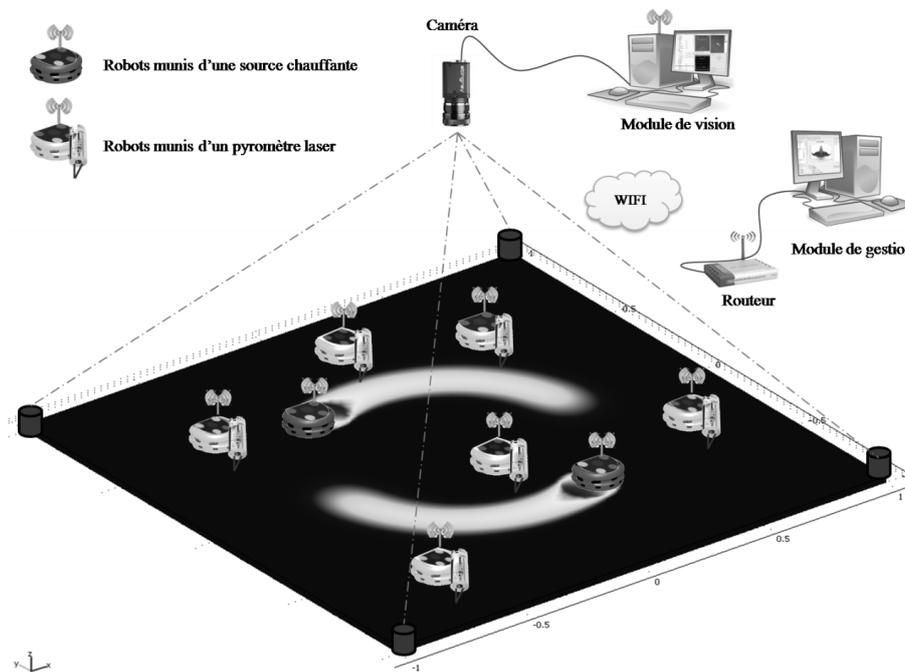


Figure 1 : Prototype du système de vision

2.2. Les différents éléments constitutifs

2.2.1. Les sources chauffantes

Une chauffe sans contact a été retenue afin d'éviter les problèmes inhérents aux déplacements des sources mobiles. Il s'agit d'ampoules halogènes Philips de deux types (24V, 250W, GX5.3) et (36V, 400W, GY6.35), pilotées par des alimentations programmables. Ces ampoules (figure 2) permettent une chauffe radiative $\phi_{chauf}(x, y; t)$ dont on suppose que la composante temporelle est uniquement liée au pilotage de l'alimentation. Le retard inhérent à la chauffe du filament est négligé par rapport à la durée de l'expérimentation (environ 30 minutes) et aux dynamiques retenues pour les montées en température.



24V, 250W, GX5.3

36V, 400W, GY6.35

Figure 2 : Les sources chauffantes

2.2.2. Les capteurs

Pour les mesures de températures, les pyromètres Optris® CSLaser-LT-CF1 sont choisis afin de réaliser une acquisition sans contact sans perturber le milieu tout en facilitant le déplacement des capteurs. Leur géométrie est celle d'un cylindre d'environ 10cm de long et 5cm de diamètre (figure 3). La distance de mesure entre le pyromètre et la plaque est de 7cm et le diamètre du disque de mesure (correspondant à 90% du rayonnement émis) est de 1.4mm. Les pyromètres fournissent une température moyenne sur des zones d'environ 2mm².

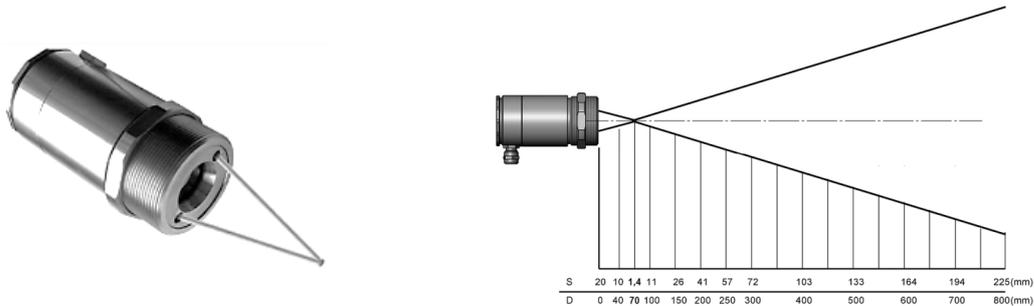


Figure 3 : Le pyromètre Optris® CSLaser-LT-CF1

Pour chaque robot équipé d'un pyromètre délivrant un courant en sortie sur la plage 4-20mA, un convertisseur analogique numérique de 10 bits (intégré dans la carte E/S KoreIO branchée sur la carte d'extension des robots) traite les valeurs analogiques. Le courant n'est pas une entrée directe de la carte : une résistance de 250Ω est ajoutée afin d'obtenir des valeurs de la tension quasi linéaire sur la plage 1-5V correspondant à la plage de température $\theta \in [273, 773]$ en K. La température mesurée est calculée à partir de la valeur numérique du convertisseur d'une résolution de 0.1K. Le robot envoie à l'ordinateur de gestion une trame (protocole TCP/IP serveur/client) contenant position, température et heure d'acquisition.

2.2.3. Les robots

Pour déplacer les sources et les pyromètres, les robots Khepera-III (figure 4) développés par la société K-Team de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ont été choisis [12]. Le diamètre de chaque robot est de 13cm pour une hauteur de 7cm. Ils sont capables de déplacer une charge inférieure à 2kg à une vitesse maximale de 50cm/s.



Figure 4 : Robot Khepera-III équipé d'un pyromètre et Caméra Stingray F-046C

L'autonomie affichée est de 8h (à vitesse constante et sans la plateforme embarquée Korebot-II) alors que la durée des campagnes expérimentales prévues est de l'ordre de 30 minutes. Une carte réseau WiFi (norme 802.11b/g) est intégrée à chaque robot afin de permettre sa connexion à l'ordinateur de gestion via un routeur WiFi grâce auquel ils peuvent échanger des informations sous la forme de trames de données en utilisant le protocole TCP/IP (serveur/client).

2.2.4. La caméra

Le logiciel SSL-vision [13, 14] est utilisé afin de surveiller et corriger le déplacement des robots. Une caméra visible Stingray F-046C (Allied Vision Technologies) d'une résolution de 780x580 pixels et d'une fréquence d'acquisition de 55Hz a été choisie. Cette caméra (figure 4) est positionnée au-dessus de la plaque à 150cm de hauteur afin que tous les robots soient surveillés. Elle est câblée avec l'ordinateur de vision via le port FireWire 1394b.

2.2.5. Le routeur WiFi

Pour l'interconnexion entre les dispositifs en profitant de la technologie de communication sans-fils, un routeur WiFi a été choisi. Cet équipement de référence TL-WR740N de TP-LINK, combine les modes filaires et sans-fil. Ce routeur WiFi N est compatible avec la norme 802.11b/g et peut permettre, à une distance d'interconnexion inférieure à 25m, une vitesse maximale de transfert jusqu'à 150 Mbps.

2.3. Protocole de communication

Le protocole de communication TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) est actuellement le plus utilisé dans les réseaux locaux et Internet entre 2 programmes ou 2 machines (un client et un serveur). La couche TCP assure que les données envoyées sont toutes reçues par la machine destinataire. Le protocole d'échange de données entre le client et le serveur via les sockets (interfaces de connexion) réseaux TCP/IP est modélisé figure 5.

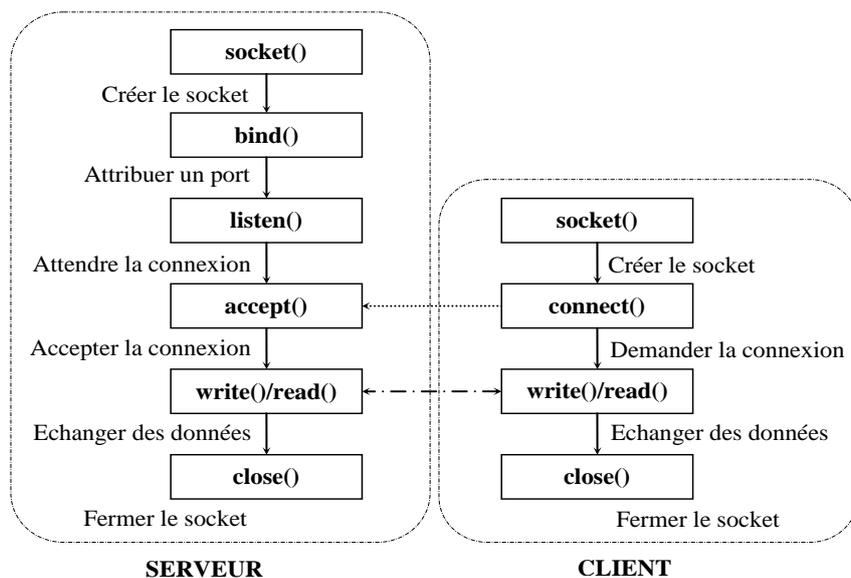


Figure 5 : protocole d'échanges TCP/IP

Le routeur WIFI est l'élément central de cette expérimentation ; il est le seul lien entre l'ensemble des robots, le module de vision et le module de contrôle intelligent (voir figure 1). Il gère la connexion des robots au module de gestion (de l'ensemble des capteurs et des sources mobiles) et au module d'identification paramétrique. Ces différents éléments possèdent chacun une adresse IP unique permettant ainsi le dialogue entre eux. Ces éléments ouvrent une socket d'écoute et attendent une demande de connexion provenant d'une autre machine. Lorsqu'une tierce machine tente de se connecter à la machine hôte celle-ci active la connexion et le dialogue entre les deux machines est mis en place. Les données sont échangées sous forme de trames de données qui sont codées de manière spécifique.

2.4. Localisation basée sur la vision

Les robots Khepera III disposent de roues codeuses permettant de calculer le déplacement relatif effectué lors de la mise en marche des moteurs (mesure odométrique). Cependant, les frottements entre les roues du robot et la plaque engendrent des biais (en particulier lors des virages serrés). Afin de corriger ces erreurs, une vérification du positionnement robot est mise en place via le logiciel de traitement d'images (logiciel SSL-vision [13,14]). Ce logiciel utilise les images fournies par la caméra et détecte des marqueurs préalablement enregistré (figure 1). Ces marqueurs servent d'identifiant unique ; en apposant un marqueur sur chaque robot, il est possible de connaître son positionnement (x_0, y_0) et son orientation α_0 dans un repère Oxy . Une fois les nouvelles coordonnées calculées, celles-ci sont comparées avec les mesures odométriques des robots afin d'estimer au mieux les coordonnées des robots sur la plaque. Après traitement des mesures et procédure d'identification quasi en ligne, chaque robot reçoit une trame de données qui contient ses coordonnées actuelles (x_0, y_0) , son orientation actuelle (α_0) et la position désirée (x_1, y_1) . Il calcule alors une trajectoire pour se déplacer de la position actuelle (x_0, y_0, α_0) à la position désirée (x_1, y_1) en évitant les obstacles (le cas échéant). A l'aide du logiciel SSL-vision, les positions des robots sont mises à jour chaque seconde afin de corriger les erreurs de déplacement et d'éviter d'accroître l'imprécision sur les mesures de température.

3. Identification de sources chauffantes

Dans le paragraphe précédent, l'ensemble du prototype expérimental a été décrit. Celui-ci étant relativement ambitieux, de nombreux aspects techniques ont été abordés. Compte tenu de la place limitée pour cette communication, il est impossible de détailler la procédure d'identification quasi en-ligne. Celle-ci est décrite dans la communication conjointe intitulée « Stratégie de sélection de capteurs pour une identification de flux thermique quasi en ligne » [10]. Les points principaux sont toutefois décrits ci-après. Chaque source chauffante est considérée uniforme sur un disque dont le centre est en mouvement. La plaque d'aluminium (posée sur un isolant) est fine et les transferts dans l'épaisseur sont négligés. Une étude préalable a démontré la validation d'un modèle 2D décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial \theta(x, y; t)}{\partial t} - \lambda \Delta \theta(x, y; t) = \frac{\Phi(x, y; t) - 2h(\theta(x, y; t) - \theta_0)}{e} & \forall (x, y; t) \in \Omega \times [0, t_f] \\ \theta(x, y; 0) = \theta_0 & \forall (x, y) \in \Omega \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, y; t)}{\partial \vec{n}} = 0 & \forall (x, y; t) \in \partial\Omega \times [0, t_f] \end{cases} \quad (1)$$

Le terme $\Phi(x, y; t)$ contient à la fois les informations sur les trajectoires et sur les densités de flux. Il s'agit donc d'identifier $\Phi(x, y; t)$ à partir des mesures de températures considérées ponctuelles et mobiles. Le problème inverse pour l'identification des flux de chauffe (puissance variable et trajectoire) est résolu en minimisant un critère quadratique. Celui-ci est évalué à chaque itération de l'algorithme du gradient conjugué par la résolution du problème direct (1). Ce dernier, décrit par un système d'équations aux dérivées partielles, est résolu numériquement à l'aide de la méthode éléments finis implantée numériquement par le code Comsol interfacé avec Matlab. Afin d'estimer la direction de descente à chaque itération, un problème adjoint (issu d'une formulation Lagrangienne) est résolue par la même méthode

numérique. Il permet le calcul du gradient du critère à minimiser et donc de la direction de descente (voir [4]). La profondeur de descente (optimale dans la direction de descente) est estimée à partir de la résolution du problème de sensibilité. Il est important de noter qu'à chaque itération de l'algorithme d'identification, trois problèmes décrits par des équations aux dérivées partielles sont résolus par la même méthode numérique. Il est ainsi judicieux de conserver le même maillage et les mêmes matrices d'assemblage afin de réduire les temps de calculs. Ces trois problèmes sont bien posés au sens d'Hadamard [1-3]. Le critère d'arrêt de l'algorithme est lié aux incertitudes sur les mesures supposées prédominantes par rapport aux erreurs de modèle [2]. La procédure itérative d'identification est ainsi stoppée avant de chercher à donner une signification erronée au bruit de mesures (qui présente une fréquence élevée par rapport à la dynamique des transferts thermiques étudiés).

L'identification quasi en ligne est réalisée en considérant un intervalle temporel d'observations « glissant » durant le procédé. Cela signifie que la procédure d'identification est lancée dès que des mesures sont disponibles et avant la fin du procédé (ce qui serait hors ligne). Au fur et à mesure que la minimisation se poursuit en parallèle, des nouvelles observations sont disponibles et différentes stratégies peuvent être mises en œuvre : ajout en ligne de nouvelles mesures, longueur variable de l'horizon glissant, superposition des intervalles d'observations, facteur d'oubli, ... Ces différentes méthodes sont actuellement testées et des retards de l'ordre d'une minute pour un procédé de trente minutes peuvent être atteints.

En ce qui concerne le déplacement optimal des robots de mesure, celui-ci est réalisé en optimisant un critère issu des fonctions de sensibilité et des températures prédites quasi en ligne lors de la procédure d'identification.

4. Conclusions

Dans cette communication, le dispositif expérimental développé dans notre institut a été présenté. Il a pour objectif d'étudier des stratégies d'identification de sources chauffantes mobiles et de déplacement (ou de choix) de capteurs sur une géométrie 2D. Différents éléments techniques ont été brièvement décrits alors que la méthode d'identification actuellement testée est présentée dans la communication intitulée « Stratégie de sélection de capteurs pour une identification de flux thermique quasi en ligne ». A moyen terme, la configuration suivante est retenue : 2 robots mobiles chauffants, 6 robots mobiles observateurs. Toutes les 10 secondes, les 6 robots mobiles fournissent la mise à jour des mesures collectées, l'algorithme d'identification (puissance et trajectoire des 2 robots chauffants) fournit des résultats en un maximum de 10 secondes, les stratégies de déplacements de capteurs sont aussitôt évaluées et les 6 robots mobiles se redéplient à nouveau.

Références

- [1] V. Isakov, *Inverse problems for Partial Differential Equations*. Ed. Springer-Verlag, New York, (1998).
- [2] O.M. Alifanov, *Inverse heat transfer problems*. Ed. Springer-Verlag, Berlin, (1994).
- [3] V.A. Morozov, *Methods for solving incorrectly posed problems*. Ed. Springer-Verlag, New York, (1994).
- [4] M. Minoux, *Programmation mathématique – théorie et algorithmes. Seconde édition*, Ed. Tec&Doc Lavoisier, Paris, (2008).
- [5] Y. Jarny, M.N. Ozisik et J.P. Bardon, A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction, *International journal of heat and mass transfer*, 34, (1991), 2911-2919.
- [6] M. Prud'homme et T. Hung Nguyen, On the iterative regularization of inverse heat conduction problems by conjugate gradient method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 25- 7, (1998), 999-1008.
- [7] S. Beddiaf, L. Perez, L. Autrique et J.C. Jolly, Simultaneous determination of time-varying strength and location of a heating source in a three-dimensional domain, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 22- 1, (2014), 166-183.
- [8] S. Beddiaf, L. Perez, L. Autrique et J.C. Jolly, Parametric identification of a heating mobile source in a three-dimensional geometry, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 23-1, (2015), 93-111.
- [9] A. Vergnaud, L. Perez et L. Autrique, On-line monitoring of surfacic mobile heating sources, *Proc International Conference on Inverse Problems in Engineering*, (Cracovie, Pologne, 12-15 Mai 2014).
- [10] A. Vergnaud, L. Perez, Stratégie de sélection de capteurs pour une identification de flux thermique quasi en ligne, *Proc Congrès de la Société Française de Thermique*, (La Rochelle, France, Mai 2015).
- [11] A. Vergnaud, L. Perez, P. Lucidarme, L. Autrique, DARC-EDP: Conception du prototype, *Quatrième Journées des Démonstrateurs en Automatique*, (Angers, France, Juin 2013).
- [12] F. Mondada, E. Franzi et A. Guignard, The Development of Khepera, *Proc. 1st International Khepera Workshop*, (Paderborn, December, 1999).
- [13] L.A. Martinez-Gomez, A. Weitzenfeld, Real Time Vision System for a Small Size League Team. *Proceedings of the 1st IEEE Latin American Robotics Symposium*, (Mexico city, Mexico, 28-29 Octobre 2004).
- [14] S. Zickler, T. Laue, O. Birbach, M. Wongphati et M. Veloso, SSL-Vision: The Shared Vision System for the RoboCup Small Size League, *RoboCup 2009: Robot Soccer World Cup XIII*, Springer, (2009), 425-436