HAL
open science

Asservissement visuel pour le guidage d'engins agricoles

Philippe Martinet, Debain Christophe, Michel Berducat, Pierre Bonton, Jean Gallice

To cite this version:

Philippe Martinet, Debain Christophe, Michel Berducat, Pierre Bonton, Jean Gallice. Asservissement visuel pour le guidage d'engins agricoles. J3A'97 - Journées Automatique, Agriculture et Agro-Alimentaire, Club EEA, MENESR, PRC-GdR Automatique et ISIS, Oct 1997, Clermont-Ferrand, France. hal-02465575

HAL Id: hal-02465575

https://inria.hal.science/hal-02465575

Submitted on 4 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Asservissement visuel pour le guidage d'engins agricoles

P. Martinet*, C. Debain, M. Berducat**, P. Bonton* et J. Gallice***

* *LASMEA, Université Blaise Pascal UMR 6602 du CNRS, 63177 Aubière cedex, France*

** *CEMAGREF, Division Techniques du Machinisme Agricole, 03150 Montoldre, France*

Résumé

Depuis le debut des années 90, nous travaillons sur un système de contrôle temps réel appliqué au guidage d'engins agricoles par vision monoculaire. Il s'agit d'alléger les tâches de pilotage confiées aux conducteurs d'engins en proposant un co-pilotage par un système entièrement automatique. Ces tâches concernent particulièrement les travaux de récolte (moisson), de fenaison, et de labour. Dans cet article, nous nous interessons à l'aspect contrôle du véhicule par vision monoculaire à partir de la détection de l'interface fauché/non-fauché dans l'image. Le vehicule considéré est une moissonneuse-batteuse. L'approche fonction de tâche introduite par *Samson et Espiau* à la fin des années 80 est utilisée. Un premier contrôleur est élaboré pour les récoltes sur terrains plats. Un second est proposé pour tenir compte des effets de la pente.

Mots Clefs : Guidage d'Engins agricoles, Commande Référencée Vision, Commande Adpatative, Vision Monoculaire

1 Introduction

Depuis plusieurs années, le guidage d'engins agricoles a retenu l'attention des chercheurs. Lorsqu'on utilise une caméra comme capteur, la perception en environnement naturel est un problème difficile à résoudre. Nous avons mené un certain nombre de travaux dans ce domaine, en particulier dans le but de détecter la limite de fauche (Derras *et al.* 1991), (Derras 1993). La mise en oeuvre de processus de segmentation markovienne permet d'obtenir une limite à des cadences satisfaisantes pour ce type d'application.
Si à l'heure actuelle, beaucoup d'auteurs travaillent sur la commande de robots manipulateurs par retour visuel, en revanche peu de chercheurs se sont intéressés au problème

du guidage de robots mobiles dans l'espace image. On peut mentionner les travaux de (Pissard-Gibollet 1993) et de (Khadraoui *et al.* 1995). L'avantage de cette approche est d'éviter les étapes de reconstruction et de calibrage qui sont souvent coûteuses en temps et difficiles à maîtriser.
Dans cet article, nous nous intéressons au pilotage automatique d'engins agricoles par vision monoculaire. Nous développons uniquement l'aspect modélisation et commande et nous supposons que l'aspect perception, bien que difficile à traiter, est résolu.

Dans une première partie, nous présentons les aspects modélisation mis en oeuvre pour synthétiser les lois de commande et en particulier la modélisation de la scène ainsi que la modélisation cinématique du véhicule. Dans une seconde partie, une loi de commande pour le guidage sur terrain plat est proposée. Enfin, dans la troisième partie, une autre loi de commande plus originale permet d'assurer le guidage sur des terrains en pente.

2 Modélisation de l'interaction scène-véhicule

Nous nous intéressons à l'approche *fonction de tâche* introduite par *Espiau et al.* (Espiau *et al.* 1992), (Samson *et al.* 1991). Cette fonction traduit une contrainte virtuelle d'interaction cinématique entre la scène et le capteur embarqué sur l'effecteur du robot. Dans notre application, le capteur considéré est une caméra embarquée dans un véhicule. Pour mettre en oeuvre l'approche *fonction de tâche*, il est nécessaire de modéliser la scène et la cinématique du véhicule.

2.1 Modélisation de la scène

La modélisation de la scène consiste en l'élaboration de la matrice d'interaction (ou Jacobien de Tâche) qui permet de relier les variations des signaux capteurs (issus de la caméra observant la scène) en fonction du mouvement appliqué au capteur. Ainsi, nous pouvons écrire (Chaumette 1990), (Hager *et al.* 1996):

$$\dot{\underline{s}} = \frac{d\underline{s}}{dt} = \frac{\partial \underline{s}}{\partial \underline{r}}.\frac{d\underline{r}}{dt} + \frac{\partial \underline{s}}{\partial t} = L_{\underline{s}}^T.\frac{d\underline{r}}{dt} + \frac{\partial \underline{s}}{\partial t} \tag{1}$$

Dans le cas d'une scène fixe ($\frac{\partial \underline{s}}{\partial t} = 0$), nous obtenons la relation:

$$\dot{\underline{s}} = L_{\underline{s}}^T.T_c \tag{2}$$

où $\dot{\underline{s}}$ représente la variation du signal capteur $\underline{s}$ en fonction du temps, T_c est le torseur cinématique appliqué à la caméra ($T_c = (\underline{V}, \underline{\Omega})^T = (V_x, V_y, V_z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)^T$) et $L_{\underline{s}}^T$ la *matrice d'interaction*.

L'expression de la matrice d'interaction $L_{\underline{s}}^T$ dépend de la nature des informations visuelles contenues dans $\underline{s}$ et s'obtient en utilisant les équations bien connues du flot optique (Faugeras 1993), (Paul 1982). Généralement nous utilisons un modèle simplifié de la caméra avec une focale unité.

La scène est représentée par une ligne droite (droite $3D$), à suivre sur le sol, et sa projection dans le plan image (droite $2D$) (voir figure 1). Nous paramétrons cette dernière en utilisant le paramétrage (θ, ρ).

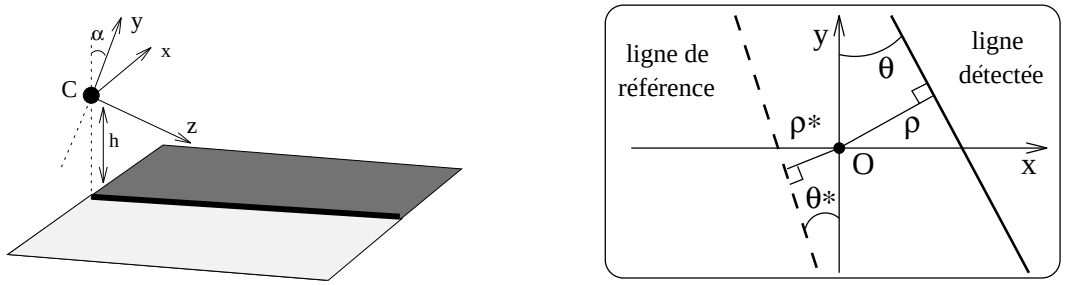


FIG. 1 – *(a): Ligne droite 3D (b): Projection dans l'espace image*

Ainsi, à chaque itération la position et l'orientation de la machine sont représentées par la valeur du signal capteur $\underline{s} = (\theta, \rho)$.

L'équation du plan contenant la ligne désirée par rapport au repère caméra est donnée par:

$$y \ \cos\alpha + z \ \sin\alpha + h = 0 \tag{3}$$

où α représente l'angle d'inclinaison de la caméra (voir figure 1(a)).

Bien souvent, nous écrivons la relation d'interaction (2) à la position d'équilibre $\underline{s} = \underline{s}^*$:

$$\dot{\underline{s}} = L^T_{|\underline{s}=\underline{s}^*} \ T_c \tag{4}$$

et nous utilisons cette relation pour synthétiser la loi de commande lorsque la position courante n'est pas très loin de cette position d'équilibre.

En reprenant la définition de la matrice d'interaction, et considérant $\theta = \theta^*$ and $\rho = \rho^*$, nous pouvons écrire $L^T_{\underline{s}}$ à la position d'équilibre, soit:

$$L^T_{|\underline{s}=\underline{s}^*} = \begin{pmatrix} \lambda^*_\theta \cos\theta^* & \lambda^*_\theta \sin\theta^* & -\lambda^*_\theta \rho^* & -\rho^* \cos\theta^* & -\rho^* \sin\theta^* & -1 \\ \lambda^*_\rho \cos\theta^* & \lambda^*_\rho \sin\theta^* & -\lambda^*_\rho \rho^* & (1+\rho^{*2}) \sin\theta^* & -(1+\rho^{*2}) \cos\theta^* & 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

avec :

$$\begin{cases} \lambda^*_\theta & = & -(\cos\alpha \cos\theta^*)/h \\ \lambda^*_\rho & = & (\rho^* \ \cos\alpha \ \sin\theta^* + \sin\alpha)/h \end{cases}$$

Le paragraphe suivant présente la modélisation cinématique du véhicule.

2.2 Modélisation du véhicule

Nous utilisons une machine qui possède deux roues motrices et deux roues directrices situées à l'arrière du véhicule. Le modèle retenu suppose qu'il n'y a pas de parties flexibles, et que le véhicule roule sur une surface plane sans glissement. Nous utilisons le modèle bicyclette pour modéliser ce véhicule. Considérons $\dot{\psi}$ comme la vitesse angulaire le long

de l'axe y, et $\dot{x}$ comme la vitesse linéaire le long de l'axe x. En utilisant ce modèle (voir Figure 2), l'angle des roues δ et le rayon de courbure r sont liés par la relation suivante (Kelly 1994):

$$\tan\delta = -\frac{L}{r} \tag{6}$$

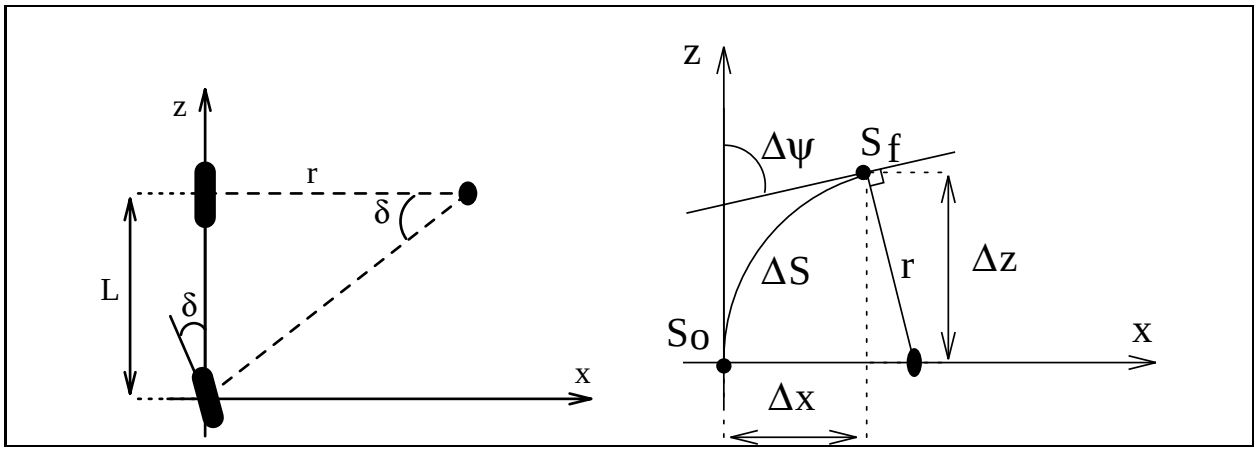


FIG. 2 – *Modèlisation cinématique du véhicule*

En considérant de petits déplacements de la machine (voir Figure 2), nous pouvons exprimer la vitesse de rotation par :

$$\dot{\psi} = -\frac{\tan\delta}{L}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \tag{7}$$

De même, la position latérale x peut être obtenue par la relation suivante:

$$\dot{x} = \frac{1-\cos\psi}{\sin\psi}[\dot{z} + \frac{z\dot{\psi}}{\sin\psi}] \tag{8}$$

L'approximation aux petits angles, (ψ et δ inférieurs à 7°) est valable dans nos applications et permet d'obtenir une nouvelle expression de (7) et (8). Ainsi, nous obtenons:

$$\dot{x} = \frac{\psi}{2}(\dot{z} + \frac{z}{\psi}\dot{\psi}) \tag{9}$$

et le système final retenu pour modéliser le véhicule est le suivant (Khadraoui *et al.* 1995):

$$\begin{cases} \dot{\psi} = -\frac{V}{L}\delta \\ \dot{x} = V\psi \end{cases} \tag{10}$$

Compte tenu que nous contrôlons seulement l'angle des roues δ à vitesse longitudinale V constante, nous exprimons δ par (Murray and Sastry 1993), (Ioos *et al.* 1988):

$$\delta = -\frac{L}{V}\dot{\psi} \tag{11}$$

3 Guidage sur terrain plat

Dans un premier temps, nous envisageons le guidage de la moissoneuse-batteuse sur terrain plat. Comme nous l'avons dit dans la partie modélisation, nous adoptons l'approche *fonction de tâche*. Cette fonction peut-être vue comme une contrainte cinématique entre le capteur caméra et l'objet cible.

3.1 Rappel sur l'approche fonction de tâche

Dans la Commande Référencée Capteur, une tâche robotique est définie comme la régulation à zéro d'une *fonction d'erreur* $\underline{e}$ appelée *fonction de tâche*:

$$\boxed{\underline{e}(\underline{r},t) = C[\underline{s}(\underline{r},t) - \underline{s}^{\star}]} \tag{12}$$

où $\underline{s}^{\star}$ représente le vecteur signal capteur désiré à la position d'équilibre, $\underline{s}(\underline{r},t)$ le vecteur signal capteur mesuré à chaque itération, et C est une matrice constante définie positive.

Une des principales difficultés de cette approche est de définir cette fonction de tâche permettant de réaliser pleinement la tâche robotique. L'interaction entre la scène et le capteur est décrite par la matrice d'interaction $L_{\underline{s}}^{T} = \frac{\partial \underline{s}}{\partial \underline{r}}$. Dans le cas l'asservissement visuel, la scène étant fixe, nous avons montré que la variation des informations visuelles était liée au torseur cinématique appliqué à la caméra par la relation $\dot{\underline{s}} = L_{\underline{s}}^{T}.T$

En considérant une décroissance exponentielle de la fonction d'erreur, c'est-à-dire:

$$\dot{e} = -\lambda e \tag{13}$$

λ étant un scalaire défini positif, nous pouvons exprimer la loi de commande par la relation suivante:

$$\boxed{T = -\lambda L_{\underline{s}}^{T+}(\underline{s} - \underline{s}^{*})} \tag{14}$$

où $L_{\underline{s}}^{T+}$ représente la pseudo-inverse de $L_{\underline{s}}^{T}$. Cette loi de commande est une loi de commande proportionnelle permettant d'effectuer des tâches de positionnement dans l'espace capteur (plan image pour une caméra).

3.2 Régulation de deux fonctions de tâche

Dans le paragraphe portant sur la modèlisation de la scène, nous avons considéré le vecteur d'informations visuelles $\underline{s} = (\theta, \rho)$. Nous définissons une fonction tâche globale $\underline{e}$ comme la somme de deux fonctions de tâche $\underline{e}_{\theta}$ et $\underline{e}_{\rho}$, telle que:

$$\underline{e} = \underline{e}_{\theta} + \underline{e}_{\rho} = C_1(\theta - \theta^{*}) + C_2(\rho - \rho^{*}) = C.(\underline{s} - \underline{s}^{*}) \tag{15}$$

avec $C = (C_1, C_2)$.

L'utilisation d'une telle fonction de tâche, nous permet de prendre en compte différents types de comportements souhaités comme par exemple une "commande douce" assimilable

à une commande en cap, et une "commande abrupte" assimilable à une commande en écart latéral. Par conséquent, nous imposons une décroissance exponentielle différente pour les deux fonctions de tâche soit:

$$\dot{\underline{e}} = -\lambda(\beta \underline{e}_\theta + \underline{e}_\rho) \tag{16}$$

avec λ and β deux constantes réelles positives.

Nous pouvons alors définir la loi de commande par:

$$T_c = -\lambda L^{T+}_{|\underline{s}=\underline{s}^*} B(\underline{s} - \underline{s}^*) \tag{17}$$

avec

$$B = \begin{pmatrix} \beta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

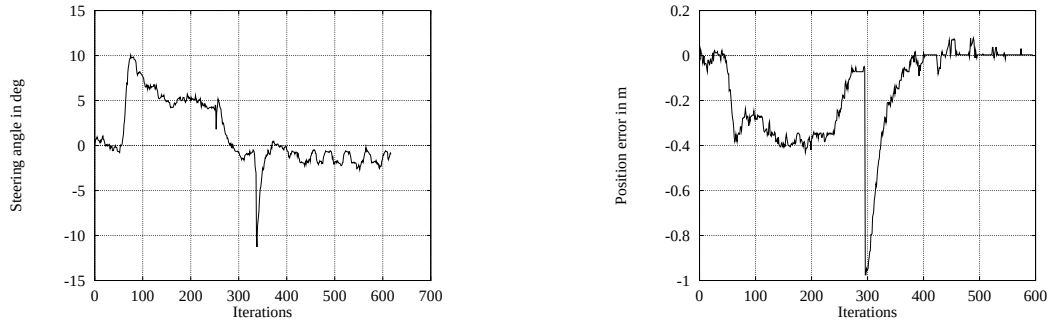
T_c représente le torseur cinématique à appliquer à la caméra. Nous pouvons extraire la composante Ω_y du torseur, et obtenir la commande de l'angle des roues par la relation :

$$\delta = -\frac{\lambda L}{V} \left[\ \beta \frac{\sin\alpha \cos\alpha}{1+h^2}(\theta - \theta^*) + \frac{h^2+\cos^2\alpha}{1+h^2}(\rho - \rho^*) \ \right] \tag{18}$$

Dans notre application, nous rappelons que la vitesse longitudinale est fixe et supposée constante. Pour illustrer cette approche, nous présentons maintenant quelques résultats.

3.3 Résultats

Nous avons développé un simulateur sous Matlab prenant en compte la cinématique du véhicule et différents types de trajectoires (ligne de fauche ou de culture) souhaitées. Dans cette partie, nous présentons seulement des résultats expérimentaux. Pour valider cette loi de commande, nous avons tracé une piste sur le sol comportant successivement une courbe, un échelon de 1 m et une ligne droite. La moissonneuse-batteuse possède deux caméras. La première est utilisée pour le guidage. La seconde sert à la mesure de l'écart latéral. La période d'échantillonnage est fixée à 200 ms proche de celle obtenue en conditions réelles en utilisant les algorithmes de traitement d'images spécialisés pour la détection de la limite de fauche. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure 3.3:



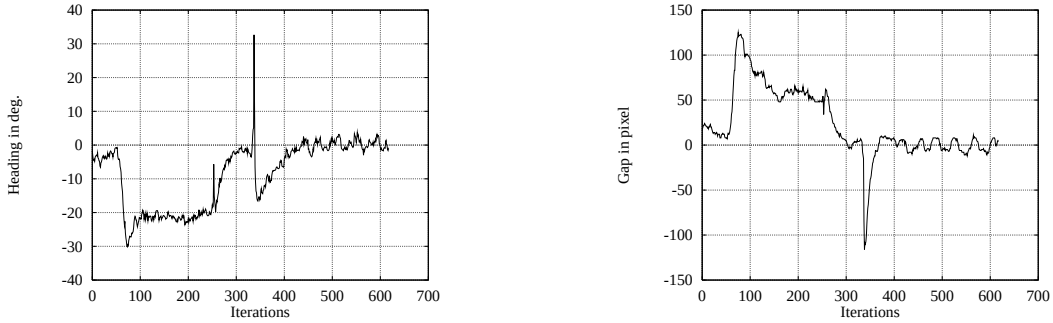


FIG. 3 – *Test à 4 km/h*

La vitesse longitudinale du véhicule est de 4 km/h et les gains de la loi de commande ont été réglés à 0.3 pour λ et 2.6 pour β. Le temps de réponse de notre machine est de 20 secondes sans dépassements. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par un conducteur humain. Une étude comparative de plusieurs méthodes de contrôle est présentée dans (Khadraoui *et al.* 1997).

4 Guidage sur un terrain en pente

Tous les essais que nous avons présentés ont été réalisés sur un terrain plat. Or, nos véhicules doivent régulièrement travailler sur des terrains en pente et avec des conditions d'adhérence précaires. L'effet de la pente se traduit par un glissement du véhicule vers le bas de la pente. Ce glissement dépend de la pente, mais aussi des conditions d'adhérence, des paramètres du véhicule, et des réactions du système de contrôle. Nous ne maîtrisons pas les paramètres de nos véhicules qui sont variables dans le temps et qui seraient coûteux à mesurer en temps réel. De même, les conditions de glissement sont très aléatoires du fait de l'irrégularité du terrain et de la variation des paramètres précédents. La difficulté est donc de corriger l'effet de la pente en utilisant uniquement les informations issues de la caméra. Pour cela, nous allons étudier l'influence de la pente du terrain sur le comportement de l'ensemble du système puis nous définirons une loi de commande permettant de contrôler efficacement nos véhicules dans de telles conditions.

4.1 Analyse de l'effet de la pente

Lorsqu'un véhicule agricole évolue sur un terrain en pente, on note deux perturbations principales. La première concerne la position et l'orientation du véhicule qui sont modifiées du fait du glissement des roues sur le sol. La seconde qui est liée à la première représentent les nouvelles conditions d'équilibre de la machine ainsi que leur traduction dans l'espace des capteurs de perception.

Nous avons simulé une pente de 20% en utilisant la première loi de commande présentée dans cet article, et observé le comportement du véhicule en particulier son orientation, la

position du point D (extrémité gauche de la barre de coupe de la moissonneuse) ainsi que l'orientation des roues. La figure 4 suivante illustre les résultats.

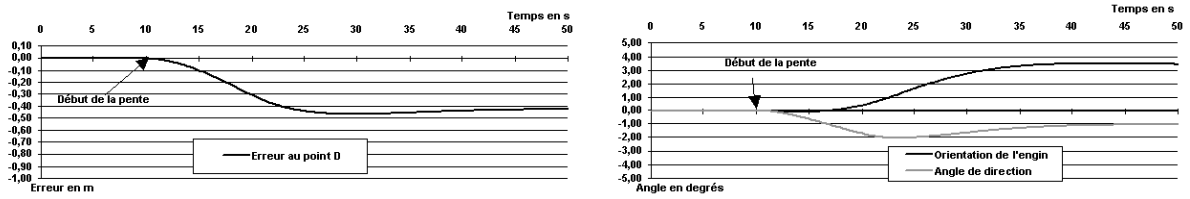


FIG. 4 – *Effet de la pente sur la position et orientation du véhicule*

Une analyse qualitative faite dans (Debain 1996) a montré que l'effet de la pente se traduit par une accélération latérale qui provoque un glissement du véhicule. De plus, l'accélération transversale peut être compensée par un angle de braquage des roues directrices équivalent à une orientation du véhicule par rapport à la trajectoire suivie.

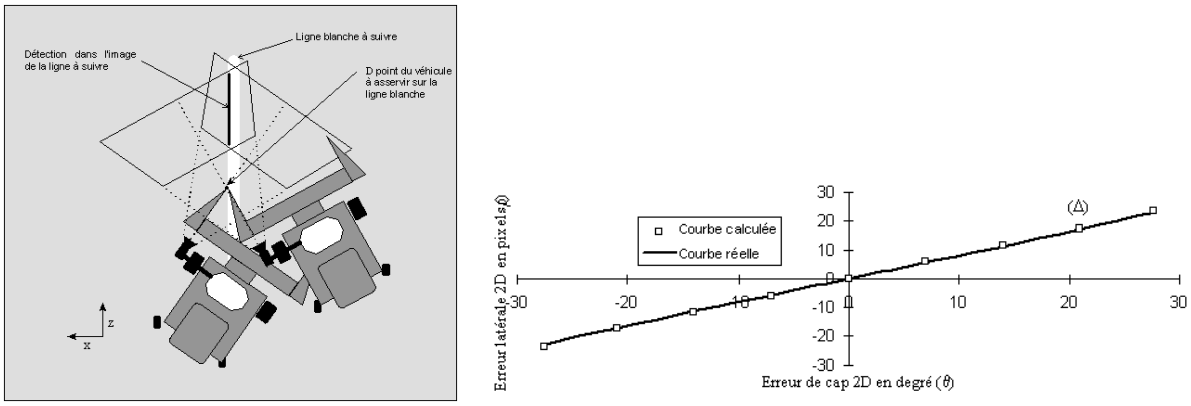


FIG. 5 – *Effet de la pente sur la modélisation de la scène*

La figure 5 montre l'effet de la pente sur la position d'équilibre et sur la perception de cette position. Il est relativement simple de calculer les nouvelles valeurs des paramètres image ρ et θ en fonction des différentes orientations de la machine. Sur la partie droite de la figure 5, nous avons représenté l'ensemble des couples (ρ, θ) calculés pour un angle du véhicule de -15 à +15 degrés par rapport à la ligne à suivre, ainsi que ceux obtenus par expérimentation. Comme nous pouvons le constater, les deux courbes sont pratiquement superposées et peuvent être approximées par une droite (Δ). Cette droite représente l'ensemble des points de fonctionnement, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs (ρ, θ) qui permettent l'équilibre de la position du véhicule pour différentes valeurs de pente. On retrouve le point (0,0) qui correspond à l'asservissement du véhicule sur une ligne droite avec un sol plan et des conditions d'adhérence optimales.

4.2 Nouvelle loi de commande

Les résultats présentés dans la figure 4 montrent que la trajectoire de la machine se stabilise parallèlement à l'interface. Cette erreur statique est généralement résolue par

l'ajout d'un intégrateur au système. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire de compenser la pente. A cette fin, nous rajoutons un module adaptatif en intégrant la droite (Δ), qui donne l'ensemble des points de fonctionnement et qui définit l'action de la pente sur la trajectoire de la machine. Nous proposons le schéma d'asservissement visuel représenté par la figure (6).

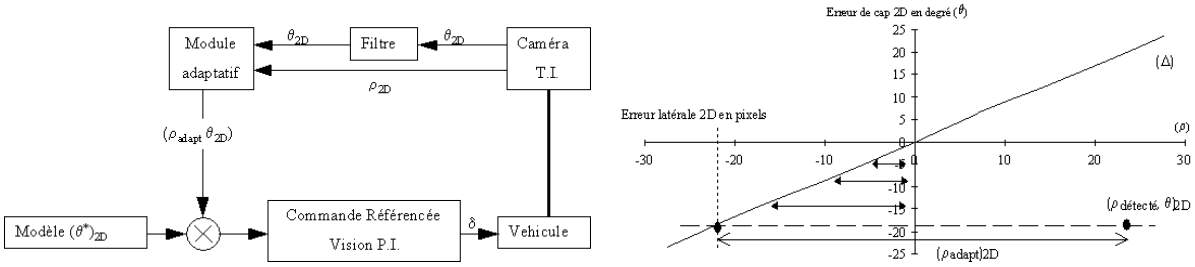


FIG. 6 – *Nouveau schéma d'asservissement visuel - Principe de l'adaptation*

La correction de la trajectoire de la machine en pente ne se fait que par l'intermédiaire du paramètre ρ, et la nouvelle loi de commande peut s'exprimer par (pour $(\rho^*, \theta^*) = (0, 0)$):

$$\delta = -\frac{\lambda L}{V}\left[\beta\frac{\sin\alpha\cos\alpha}{1+h^2}\theta + \frac{h^2+\cos^2\alpha}{1+h^2}(\rho_{adapt} + k_2.\int_0^t \rho_{adapt}du)\right] \tag{19}$$

4.3 Résultats avec la nouvelle loi de commande

Nous avons simulé et expérimenté cette nouvelle loi de commande. Les résultats sont présentés par la figure 7.

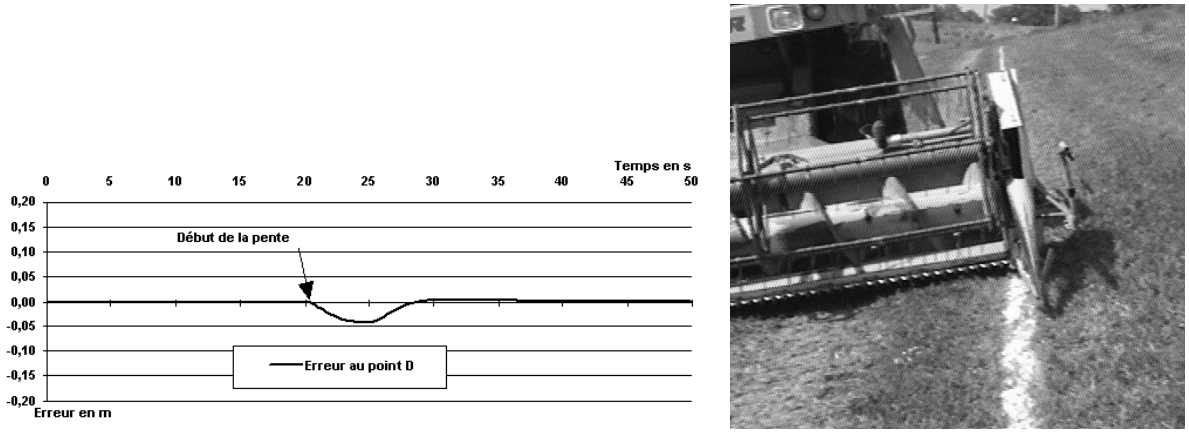


FIG. 7 – *Résultats simulés et expérimentaux en présence de pente*

La courbe simulée précédente montre que l'effet de la pente est corrigé en 10 s et que l'erreur qu'elle provoque n'excède pas 5 cm. L'expérimentation réelle sur un terrain ayant une pente de 20% est illustrée par la photo. Malheureusement, nous n'avons pas pu utiliser une seconde caméra pour mesurer la qualité de cet asservissement.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une application de guidage d'engins agricoles par vision monoculaire afin de soulager le conducteur dans les tâches répétitives et longues de récoltes. L'interaction entre la scène et le véhicule est modélisée par la projection de la limite de culture ou de fauche dans le plan image. Nous utilisons le modèle bicyclette pour modéliser la moissonneuse-batteuse. L'approche fonction tâche permet dans notre cas d'éviter l'étape de localisation, et il suffit dans cette application de connaître l'interaction scène/véhicule à l'équilibre. Le guidage sur terrain plat ne pose pas de problème en soi, et une loi de commande proportionnelle suffit à cet effet. Par contre, dans des conditions réelles et difficiles comme les terrains en pente cette approche présente des limites. Une solution est proposée avec un schéma d'asservissement visuel adaptatif en fonction de la pente. Les résultats tant simulés qu'expérimentaux montrent un bon comportement de cette nouvelle loi de commande. Nos futurs développements porteront sur la modèlisation plus précise des effets de la pente ainsi que sur ceux inhérents à la courbure de la limite de culture ou de fauche.

Références

Chaumette, F. (1990). La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques. PhD thesis. IRISA/INRIA-Rennes. Rennes, France.

Debain, C. (1996). Lois de commande pour le contrôle et la mobilité de machines agricoles. PhD thesis. Blaise Pascal. LASMEA.

Derras, M. (1993). Segmentation non supervisée d'images texturées par champs de Markov : Application à l'automatisation de l'entretien des espaces naturels. PhD thesis. Blaise-Pascal. Clermont-Ferrand, France.

Derras, M., M. Berducat and P. Bonton (1991). Vision guided mower for the upkeep of natural environment. In: *Proceedings of the 1st International seminar of on-machine vision systems for the agricultural and bio-industries*. Montpellier. pp. 37–46.

Espiau, B., F. Chaumette and P. Rives (1992). A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*.

Faugeras, O. D. (1993). *Three Dimensionnal Computer Vision : Geometric Viewpoint*.

Hager, G.D., S. Hutchinson and P. Corke (1996). *Visual Servo Control*. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis Hilton and Towers, Minneapolis, Minnesota. Tutorial TT3.

Ioos, E., M. Boulle and P. Tournassoud (1988). Etude d'un sous-système de navigation pour un robot mobile. Technical Report 783. INRIA. INRIA Rocquencourt, France.

Kelly, A. (1994). A partial analysis of the high speed autonomous navigation problem. Technical Report CMU-RI-TR-94-16. The Robotics Institute Carnegie Mellon University. 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213.

Khadraoui, D., C. Debain and R. Rouveure (1997). Vision based control in driving assistance of agricultural vehicles. Technical report. Lasmea. Université Blaise Pascal.

Khadraoui, D., P. Martinet and J. Gallice (1995). Linear control of high speed vehicle in image space. In: *Second International Conference on Industrial Automation*. IAIA. pp. 517–522.

Murray, R.M. and S.S. Sastry (1993). Nonholonomic motion planning: steering using sinusoïds. *IEEE Transactions on Automatic Control* **38**(5), 700–716.

Paul, R. P. (1982). *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. MIT Press - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02142.

Pissard-Gibollet (1993). Conception et commande par asservissement visuel d'un robot mobile. PhD thesis. Ecole des mines de Paris.

Samson, C., M. Le Borgne and B. Espiau (1991). *Robot Control. The task function approach*. ISBN 0-19-8538057. Oxford.