

Analyse du mouvement humain avec validation de modèles

†Juhui WANG, Guy LORETTE et Patrick BOUTHEMY

IRISA/INRIA

Campus Universitaire de Beaulieu
35042 Rennes Cedex, France

†l'auteur est actuellement au LATI

IRESTE-Université de Nantes
La Chantreterie, CP 3003
44087 Nantes Cedex 03**RÉSUMÉ**

Une contrainte essentielle utilisée dans l'analyse du mouvement à partir de séquences d'images est l'hypothèse de rigidité de la structure et du mouvement observés. Cette contrainte est souvent trop restrictive dans des applications réelles. Dans de tels cas, l'approche usuelle se montre parfois inefficace et conduit à des solutions instables. Dans cet article, on cherche à résoudre ce problème par une prise en compte explicite des écarts au modèle considéré, c.a.d. des perturbations à caractère local. L'application à des mouvements humains constitue notre principale motivation. Les scènes sont observées par une caméra fixe et des connaissances sur la structure et le type de mouvement des objets sont supposées disponibles. Le traitement a pour objectif de fournir une information quantitative sur le mouvement 3D principal.

1 Introduction

Les méthodes actuelles d'étude du geste humain reposent sur l'utilisation de marqueurs passifs [1] ou actifs [2]. Les images obtenues sont ensuite examinées une par une et les coordonnées des points ainsi repérés sont relevées et servent de base à l'étude automatique du mouvement. Bien que ces méthodes soient utiles dans certains cas, elles présentent de nombreuses limitations, du fait de la mise en place de marqueurs, de repères, de fils de raccordement qui peuvent gêner ou modifier les gestes observés. Notre recherche vise à s'affranchir totalement de ces contraintes matérielles et nous proposons une méthode d'analyse directe des images acquises.

La démarche développée peut se résumer en trois étapes principales: Tout d'abord, chaque membre du corps présent dans le geste est subdivisé en un ensemble de régions. A chaque région correspond un modèle de mouvement général qui permet de décrire une classe de mouvement plus large que celle correspondant à un mouvement rigide. Ensuite, les régions dont le mouvement n'est pas cohérent avec le modèle de mouvement principal supposé, tel que le mouvement de pédalage, le mouvement de saisie d'objet, etc. sont détectées et éliminées dans la suite de l'analyse. Le modèle de mouvement principal est formé à partir de connaissances a priori sur le geste étudié, et le schéma de validation du modèle de mouvement principal est effectué à l'aide d'un critère d'information statistique en l'occurrence le critère d'Akaike. Ceci permet d'éliminer les régions de mouvement perturbé et de restituer de façon globale et fiable le mouvement principal. Enfin, l'interprétation est réalisée selon une méthode directe à partir des seules régions déclarées valides.

ABSTRACT

Motion and structure rigidity is one of the most essential assumptions used in 3D motion analysis from image sequence. Because of perturbation, this rigidity requirement is often locally violated in many real-world applications, and classic methods usually fail to bring into stable solutions. In this paper, we try to sort out this problem by taking account of local deformation in motion analysis and 3D motion interpretation. Human motion analysis consists of our principle objective. The scene is observed with one only camera, and the human motion patterns to analyze have been supposed a priori known. The treatment is aimed at quantitative interpretation of the main motion of human gestures.

2 Segmentation

Ayant choisi l'expression (1) ci-dessous comme modèle de mouvement 2D général \mathcal{A} définie par un vecteur Θ de 10 paramètres, la fonction d'énergie dérivée de l'hypothèse d'invariance d'intensité lumineuse sur la trajectoire de mouvement est décrite dans l'équation (2). Le choix de ce modèle de mouvement est basé sur une double considération. D'une part, il permet de décrire une classe de mouvements plus large que celle correspondant à un projeté du mouvement rigide, et de distinguer la classe de mouvements rigides des mouvements déformables. D'autre part, la détermination du mouvement 3D pour certains types de mouvements tels que mouvement rigide, mouvement articulé, etc. à partir de ce modèle est immédiat. Ceci facilite beaucoup la phase d'interprétation.

On considère donc le modèle de mouvement paramétré suivant :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_1 \cdot x \cdot y + \theta_2 \cdot (1 + x^2) + \theta_3 \cdot y + \theta_4 \cdot z^{-1} + \theta_5 \cdot x \cdot z^{-1} \\ \theta_6 \cdot (1 + y^2) + \theta_7 \cdot x \cdot y + \theta_8 \cdot x + \theta_9 \cdot z^{-1} + \theta_{10} \cdot y \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

où x, y sont les coordonnées d'un pixel p dans le plan image, z^{-1} représente l'inverse de la profondeur du point P de la surface d'un objet ayant pour image p , dans notre étude, z^{-1} est supposée a priori connue, et définit la structure 3D des objets dans l'espace, $(u, v)^t$ est le vecteur de mouvement apparent du point p .

L'identification des paramètres Θ reviendra à minimiser la fonction suivante [3] :

$$U = \mu \sum_{c \in C} (1 - \delta_{e_p = e_q}) + \sum_{p \in S} \frac{1}{2\sigma^2} [I_t(p) - I_{t+\Delta t}(\mathcal{A}_{e_p}(\Theta, p))]^2 \quad (2)$$

où δ désigne le symbole de Kronecker, μ une constante positive prédéterminée, et p, q deux sites voisins, e_p, e_q les étiquettes (c.a.d. les numéros des régions segmentées) attribuées aux sites p et q , et C l'ensemble des cliques associées



au système de voisinage considéré, qui est ici l'ensemble des cliques binaires associées à un système de voisinage d'ordre 2.

Le premier terme est un facteur de régularisation qui favorise une segmentation en régions homogènes, et le second terme est la forme exacte de la formulation par moindres carrés qui exprime l'adéquation du modèle aux données d'observation.

Cette dérivation résulte d'une modélisation Markovienne du problème considéré. La recherche de la carte de segmentation optimale au sens du modèle du mouvement \mathcal{A} revient à minimiser la fonction d'énergie (2). Ceci a été résolu selon un schéma de relaxation déterministe du type ICM. Les lecteurs intéressés peuvent se reporter à [3].

3 Description et modélisation de gestes humains

Nous avons choisi une méthode modulaire pour représenter la structure et le mouvement des objets 3D. Cette méthode permet de décomposer l'objet complexe en une suite de primitives simples imbriquées dont la structure et le mouvement sont spécifiés par un ensemble de paramètres globaux. Dans le cas du mouvement humain, les membres du corps sont représentés par des cylindres, et le mouvement du geste est approximé par un système d'objets articulés.

Le mouvement de pédalage sur un vélo d'appartement, qui représente le premier exemple traité, est modélisé par deux rotations : la rotation de la cuisse autour de la hanche et la rotation de la jambe autour du genou. Nous avons supposé que le point correspondant au centre de la hanche reste fixe durant le mouvement et qu'il n'y a aucun glissement entre la cuisse et la jambe au niveau du genou.

Soit $O_1 = (a, b, c)^t$, $O_2 = (e, f, g)^t$ respectivement la position du centre de la hanche et du genou dans le repère de la caméra, $\Gamma = (\alpha, \beta, \gamma)^t$ le vecteur des angles de rotation de la cuisse au niveau de la hanche. Classiquement, le vecteur de vitesse d'un point P sur la surface de la cuisse peut s'exprimer de la façon suivante :

$$V_P = \tilde{\Gamma} \cdot P - \tilde{\Gamma} \cdot O_1 \quad (3)$$

où $\tilde{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix}$ est une matrice anti-symétrique déduite du vecteur Γ .

De manière identique, on peut déduire le mouvement de la jambe à partir du vecteur des angles de rotation de la jambe au niveau du genou ($\Psi = (\zeta, \eta, \xi)^t$):

$$V_P = [\tilde{\Gamma} + \tilde{\Psi}] \cdot P - \tilde{\Psi} \cdot O_2 - \tilde{\Gamma} \cdot O_1 \quad (4)$$

où O_1 , O_2 , $\tilde{\Gamma}$ ont la même signification que dans le cas du mouvement de la cuisse, et $\tilde{\Psi}$ une matrice anti-symétrique déduite du vecteur Ψ .

Dans le cas du mouvement du bras qui correspond au deuxième exemple traité, un mouvement de translation intervient au niveau de l'épaule. Soit $T_e = (U, V, W)^t$ ce vecteur de translation par rapport au repère de la caméra, $\Gamma = (\alpha, \beta, \gamma)^t$ le vecteur des angles de rotation au niveau de l'épaule, $\Psi = (\zeta, \eta, \xi)^t$ le vecteur des angles de rotation au niveau du coude, O_1 le centre de l'épaule, et O_2 le centre du coude. Le vecteur de vitesse d'un point P sur la surface du bras, exprimé dans le repère de la caméra, a pour expression :

$$V_P = \tilde{\Gamma} \cdot P - \tilde{\Gamma} \cdot O_1 + T_e \quad (5)$$

Le vecteur de vitesse d'un point P de la surface de l'avant-bras vaut :

$$V_P = (\tilde{\Gamma} + \tilde{\Psi}) \cdot P - \tilde{\Psi} \cdot O_2 - \tilde{\Gamma} \cdot O_1 + T_e \quad (6)$$

4 Détection des zones de déformation et interprétation du mouvement 3D de gestes humains

Le schéma de classification des régions de mouvement repose sur le principe suivant. Nous avons d'abord introduit la notion de *modèle de mouvement de référence*, noté $\{\mathcal{S}, \Omega\}$, qui est un modèle de mouvement issu de connaissances a priori sur la structure et le mouvement 3D des objets dans des conditions idéales (ou normales). Ensuite, pour chaque région obtenue lors de la phase de segmentation, la description du mouvement dérivée du modèle $\{\mathcal{A}, \Theta\}$, est comparée au *modèle de mouvement de référence* afin de former un critère de classification. Dans le cas où la région en question ne présente pas de perturbations sérieuses soit au niveau du mouvement soit au niveau de la structure, les modèles de mouvement $\{\mathcal{A}, \Theta\}$ et $\{\mathcal{S}, \Omega\}$ décrivent un même mouvement. Le degré de cohérence entre ces deux modèles doit être assez grand. Dans le cas contraire, c'est à dire lorsque des perturbations importantes interviennent dans le mouvement de certaines régions, le modèle $\{\mathcal{S}, \Omega\}$ n'est plus approprié pour décrire leur mouvement. Ainsi, il n'y aura plus de compatibilité entre les deux modèles présentés. Basée sur cette idée intuitive, nous avons formé un schéma de détection et d'élimination des *zones de déformation* que nous définissons comme les régions dont le mouvement n'est pas cohérent avec le mouvement correct supposé, en l'occurrence, celui décrit par le modèle de mouvement de référence $\{\mathcal{S}, \Omega\}$. Notons que le vecteur Ω dans le modèle de mouvement de référence $\{\mathcal{S}, \Omega\}$ est le vecteur de primitives du mouvement 3D des objets analysés, l'estimation de celui-ci forme aussi un schéma d'interprétation du mouvement 3D.

4.1 Formation du modèle de référence

Soit C un objet dont la géométrie dans le repère de la caméra à l'instant t_0 est définie par un vecteur de paramètres A_0 , et dont le mouvement 3D est défini par un vecteur de variables Ω . Nous considérons deux images successives I_0 et I_1 prises respectivement aux instants t_0 et t_1 , et les positions de deux pixels p et p^* , qui sont respectivement les projections sur le plan image d'un même point P de la surface des objets aux instants t_0 et t_1 .

Ceci permet de définir une fonction qui spécifie la trajectoire du mouvement apparent d'un point P de la surface des objets.

Soit \mathcal{S} cette fonction, nous avons:

$$p^* = \mathcal{S}(p, \Omega, A_0, f) \quad (7)$$

ici f est un vecteur qui définit les paramètres intrinsèques de la caméra, incluant l'origine du repère de l'image, la position et la distance focale de la caméra etc...

Etant supposé que la structure des objets A_0 et les paramètres intrinsèques de la caméra f sont a priori connus, la fonction \mathcal{S} permet de calculer le mouvement apparent à partir du vecteur Ω qui représente le mouvement 3D des objets. Nous remarquons d'après la définition de \mathcal{S} que cette fonction présente une certaine ressemblance avec le modèle de mouvement $\{\mathcal{A}, \Theta\}$. Tous deux ont pour objectif de décrire

le déplacement des pixels dans l'image induit par le mouvement des objets. Les différences entre ces deux modèles portent sur deux points : d'une part, la fonction \mathcal{S} ne permet de décrire que des mouvements particuliers tandis que le modèle $\{\mathcal{A}, \Theta\}$ décrit toute une classe de mouvements qui est d'ailleurs une classe plus large que la classe des mouvements rigides. D'autre part, la paramétrisation de la fonction \mathcal{S} est différente de celle du modèle $\{\mathcal{A}, \Theta\}$. Le modèle $\{\mathcal{A}, \Theta\}$ est défini par un vecteur de dix paramètres Θ qui est indépendant du mouvement réel des objets tandis que la fonction \mathcal{S} est définie par les primitives du mouvement 3D des objets dont la définition dépend entièrement du problème traité.

Dans le cas où les objets sont composés de primitives géométriques simples comme par exemple des surfaces planes, des cylindres, etc. la fonction \mathcal{S} , qui dépend du vecteur Ω , est une fonction analytique. Il est alors possible de calculer analytiquement le mouvement apparent à partir du mouvement 3D des objets à condition que leur structure 3D soit connue a priori.

4.2 Interprétation du mouvement de pédalage

Dans le cas du mouvement de pédalage, la substitution des équations (3) et (4) dans les équations (7) donne le mouvement apparent induit par le mouvement de pédalage tel qu'évoqué précédemment.

Soit $(u, v)^t$ le mouvement apparent induit du mouvement 3D de la cuisse en supposant projection perspective. Nous avons :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha \cdot x \cdot y + \beta \cdot (1 + x^2) - \gamma \cdot y + \\ -\alpha \cdot (1 + y^2) + \beta \cdot x \cdot y + \gamma \cdot x + \\ (\gamma \cdot b - \beta \cdot c) \cdot z^{-1} - (\beta \cdot a - \alpha \cdot b) \cdot x \cdot z^{-1} - \\ (\alpha \cdot c - \gamma \cdot a) \cdot z^{-1} - (\beta \cdot a - \alpha \cdot b) \cdot y \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

où x, y, z^{-1} ont la même signification que dans l'équation (1).

Du fait que l'équation (8) définit le mouvement apparent dans le plan image induit par un mouvement de pédalage de la partie cuisse, nous l'appelons *modèle de mouvement de référence \mathcal{S}* de la cuisse pour un mouvement de pédalage.

De même pour le mouvement de la jambe, nous pouvons élaborer son modèle du mouvement de référence \mathcal{S} par projection de son mouvement 3D sur le plan image.

Pour cela, nous remplaçons l'équation (4) dans les équations (7). Après avoir développé l'équation résultante, nous avons le mouvement apparent du point p qui est le projeté d'un point P de la surface de la jambe:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\alpha + \zeta) \cdot x \cdot y + (\beta + \eta) \cdot (1 + x^2) - (\gamma + \xi) \cdot y + \\ -(\alpha + \zeta) \cdot (1 + y^2) + (\beta + \eta) \cdot x \cdot y + (\gamma + \xi) \cdot x + \\ \{\gamma \cdot (b - f) - \beta \cdot (c - g) + (\gamma + \xi) \cdot f - (\beta + \eta) \cdot g\} \cdot z^{-1} - \\ \{\alpha \cdot (c - g) - \gamma \cdot (a - e) + (\alpha + \zeta) \cdot g - (\gamma + \xi) \cdot e\} \cdot z^{-1} - \\ \{\beta \cdot (a - e) - \alpha \cdot (b - f) + (\beta + \eta) \cdot e - (\alpha + \zeta) \cdot f\} \cdot x \cdot z^{-1} - \\ \{\beta \cdot (a - e) - \alpha \cdot (b - f) + (\beta + \eta) \cdot e - (\alpha + \zeta) \cdot f\} \cdot y \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

4.3 Interprétation du mouvement de bras

Le raisonnement développé dans la partie précédente s'applique parfaitement au cas du mouvement de bras. Le mou-

vement apparent du bras est obtenu par projection de son mouvement 3D dans le plan image.

Soit $(u, v)^t$ le mouvement apparent d'un point du bras. Nous avons :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha \cdot x \cdot y + \beta \cdot (1 + x^2) - \gamma \cdot y + \\ -\alpha \cdot (1 + y^2) + \beta \cdot x \cdot y + \gamma \cdot x + \\ (U + \gamma \cdot a - \beta \cdot c) \cdot z^{-1} - (W + \beta \cdot a - \alpha \cdot b) \cdot x \cdot z^{-1} - \\ (V + \alpha \cdot c - \gamma \cdot a) \cdot z^{-1} - (W + \beta \cdot a - \alpha \cdot b) \cdot y \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Après introduction de l'équation (6) dans l'équation (7) et après développement, le mouvement apparent de l'avant bras s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\beta + \eta) \cdot x \cdot y + (\alpha + \zeta) \cdot (1 + x^2) - (\gamma + \xi) \cdot y + \\ -(\beta + \eta) \cdot (1 + y^2) + (\alpha + \zeta) \cdot x \cdot y + (\gamma + \xi) \cdot x + \\ \{U + \gamma \cdot (b - f) - \beta \cdot (c - g) + (\gamma + \xi) \cdot f - (\beta + \eta) \cdot g\} \cdot z^{-1} - \\ \{V + \alpha \cdot (c - g) - \gamma \cdot (a - e) + (\alpha + \zeta) \cdot g - (\gamma + \xi) \cdot e\} \cdot z^{-1} - \\ \{W + \beta \cdot (a - e) - \alpha \cdot (b - f) + (\beta + \eta) \cdot e - (\alpha + \zeta) \cdot f\} \cdot x \cdot z^{-1} - \\ \{W + \beta \cdot (a - e) - \alpha \cdot (b - f) + (\beta + \eta) \cdot e - (\alpha + \zeta) \cdot f\} \cdot y \cdot z^{-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

4.4 Détection des zones de déformation

Maintenant, nous cherchons, parmi les régions obtenues dans la phase de segmentation présentée dans la section 2, celles dont le mouvement n'est pas cohérent avec le mouvement supposé a priori. Ces zones sont par définition *les zones de déformation*. Pour cela, nous testons si pour une région donnée, le mouvement dérivée de la variation d'intensité lumineuse est compatible ou non au mouvement a priori supposé. Ceci a été réalisé à l'aide du critère d'Akaike [4]. Ce critère évalue l'adéquation, en terme de la log-vraisemblance d'un modèle tout en pénalisant sa complexité (sa dimension).

D'après le raisonnement développé dans [3], nous avons la condition nécessaire suivante :

si le mouvement d'un objet (ou d'une région) vérifie le modèle de mouvement \mathcal{S} , la valeur du critère d'Akaike (AIC) du modèle de mouvement \mathcal{S} doit être inférieure à celle du modèle de mouvement \mathcal{A} .

Autrement dit, la condition nécessaire pour qu'une région soit une zone de déformation est donnée par le test suivant :

$$T_{aic} = (\text{AIC du modèle } \mathcal{S}) - (\text{AIC du modèle } \mathcal{A}) > 0 \quad (12)$$

En pratique, nous estimons d'abord pour une région donnée r le vecteur optimal $\hat{\Theta}_r$ en minimisant la fonction d'énergie (2), et nous calculons l'erreur résiduelle $\hat{U}_a(r)$ en réintroduisant $\hat{\Theta}_r$ dans la fonction d'énergie (2).

Ensuite, nous estimons pour la même région r le vecteur optimal $\hat{\Omega}_r$ en minimisant la fonction d'énergie (13), et ré-introduisons $\hat{\Omega}_r$ dans la fonction d'énergie (13) pour calculer l'erreur résiduelle $\hat{U}_s(r)$.

$$U_s(r) = \mu \sum_{c \in C} (1 - \delta_{e_p=e_q}) + \sum_{p \in S} \frac{1}{2\sigma^2} [I_t(p) - I_{t+\Delta t}(\mathcal{S}_{e_p}(\Omega_r, p))]^2 \quad (13)$$

Nous évaluons enfin les critères d'Akaike des modèles \mathcal{A} et \mathcal{S} afin de calculer la valeur de T_{aic} , cela donne le test suivant :

$$T_{aic} = \frac{1}{\sigma^2} (\hat{U}_s(r) - \hat{U}_a(r)) - 2 \cdot (\dim(\hat{\Theta}_r) - \dim(\hat{\Omega}_r)) > 0 \quad (14)$$

où $\dim(\hat{\Theta}_r)$ et $\dim(\hat{\Omega}_r)$ représentent respectivement la dimension des vecteurs Θ et Ω .



5 Résultats et conclusions

Ce schéma de détection de zones de déformation a été testé sur les deux exemples déjà décrits.

Les résultats des tests ainsi que l'interprétation du mouvement de pédalage sont présentés dans la figure 1. Les parties Principales de la cuisse et de la jambe sont détectées et correctement interprétées. Ces résultats montrent que les performances du modèle de mouvement S pour modéliser le mouvement de la cuisse et de la jambe sont beaucoup plus grandes que celles du modèle de mouvement général A . Néanmoins, nous avons constaté que l'analyse du mouvement de la cuisse était difficile à cause de la faible amplitude de son mouvement. En fait, une grande partie de la cuisse reste figée pendant le pédalage.

Les résultats obtenus dans le cas du mouvement de bras sont montrés dans la figure 2. La conclusion obtenue dans le cas du mouvement de pédalage est aussi valable dans le cas du bras. Les parties principales du bras et de l'avant-bras sont détectées et correctement interprétées. Nous précisons qu'une légère instabilité du mouvement de translation au niveau de l'épaule est apparue, ce qui est perceptible lorsque nous animons la séquence formée par projection des résultats d'analyse sur les images originales.

Une méthode efficace de détection des zones de déformation et d'interprétation de mouvement 3D vient d'être présentée. La démarche adoptée a été de rechercher et de modéliser les caractéristiques d'un mouvement spécifique. Ceci permet de déduire, à partir de connaissances sur la structure et le mouvement des objets, un modèle de mouvement de référence qui est a priori supposé correct.

L'expérimentation montre que la démarche adoptée permet d'obtenir une description robuste et satisfaisante. Cependant, nous avons constaté que l'utilisation d'une carte des profondeurs imprécises entraîne une augmentation d'erreur d'estimation du mouvement 3D. Si l'erreur d'estimation reste peu perceptible pour une analyse instantanée, l'accumulation de cette erreur durant une séquence peut entraîner un écart important entre la position réelle des objets et celle du modèle prédit à partir du mouvement estimé. Le lecteur trouvera dans [3] une procédure de suivi qui permet de limiter l'écart entre le modèle 3D et les objets réels.

6 Bibliographie

- [1] BACA A. Application of image processing to human motion analysis. In *the International Congress on Optical Science and Engineering*, Paris, France, April 1989.
- [2] MANN R.W., ANTONSSON E.K. Gait analysis : precise, rapide, automatic 3D position and orientation kinematics and dynamics. *Bulletin of The Hospital for Joint Diseases Orthopaedic Institute*, XLIII(2) :137-146, 1983.
- [3] WANG J. Analyse et suivi de mouvements 3D articulés : application à l'étude du mouvement humain. *Thèse de l'Université de Rennes 1*, Rennes, France, 1992.
- [4] SAKAMOTO Y., ISHIGURO M., KITAGAWA G. Akaike Information Criterion Statistics. *D. Reidel Publishing Company*, 1974.

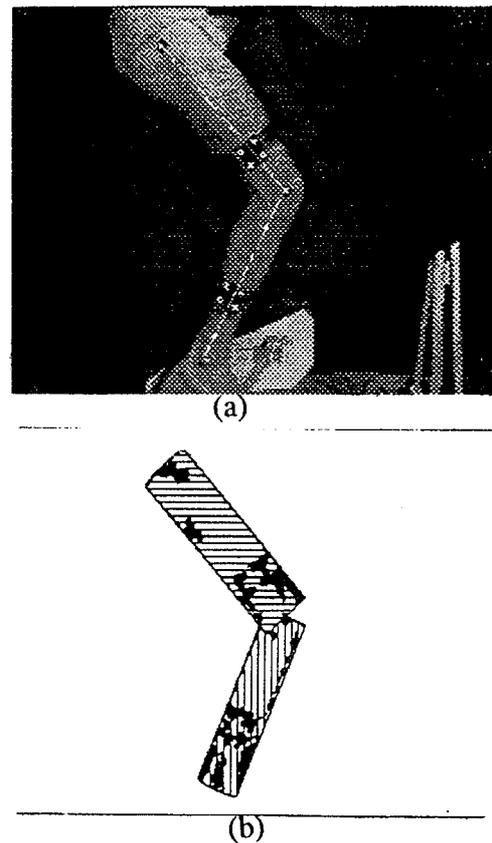


Figure 1 : Résultats obtenus pour la séquence du pédalage : (a) projection des résultats d'analyse sur l'image originale, (b) zones de mouvements (les zones de mouvement dues aux perturbations sont indiquées en noire).

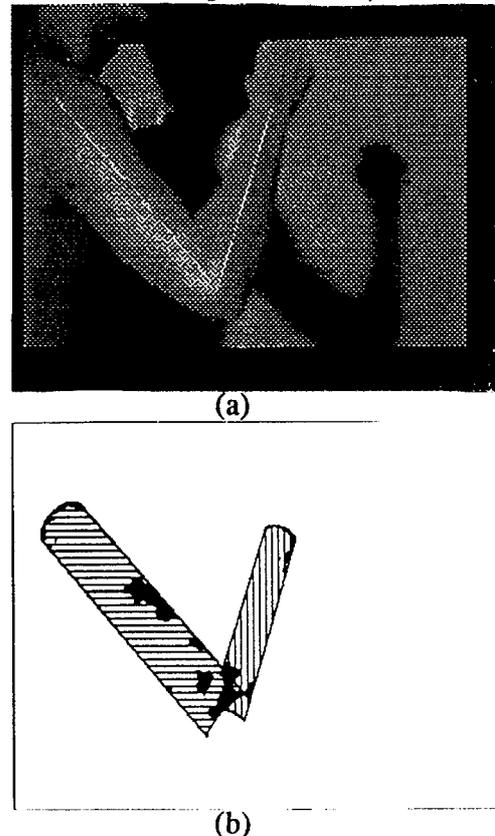


Figure 2 : Résultats obtenus pour la séquence du bras : (a) projection des résultats d'analyse sur l'image originale, (b) zones de mouvements (les zones de mouvement dues aux perturbations sont indiquées en noire).