

---

# Cinématique inverse pour personnages 3D

## Solutions analytiques et variationnelles

**Ronan Boulic, Paolo Baerlocher**

*Laboratoire d'Infographie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
CH 1015 Lausanne, Suisse  
{Ronan.Boulic, Paolo.Baerlocher}@epfl.ch*

---

*RÉSUMÉ. Cet article comporte deux parties. Tout d'abord nous rappelons les enjeux actuels de l'animation de personnages 3D complexes ainsi qu'un aperçu des techniques utilisées pour la capture de mouvements humains. Dans la seconde partie nous comparons diverses approches de cinématique inverse. L'accent est mis sur une extension de la cinématique inverse variationnelle permettant la définition de priorités relatives dans la réalisation des contraintes. Nous montrons comment améliorer les performances des calculs de façon à rendre cette technique utilisable dans un contexte d'édition interactive de postures humaines complexes.*

*ABSTRACT. This article is divided in two parts. First we recall the current issues in the field of complex 3D character animation and an overview of current motion capture techniques. In the second part we compare various Inverse Kinematics approaches. We focus on a recent extension of variation-based Inverse Kinematics allowing the definition of clear priorities among constraints. We show how to improve the computing cost to make this technique usable for the interactive editing of complex human postures.*

*MOTS-CLÉS : structure articulée, modèle humain, standardisation, cinématique inverse.*

*KEY WORDS: articulated structure, human modelling, standardization, inverse kinematics.*

---

## **1. Introduction**

L'objet du présent article est d'offrir une comparaison entre deux familles d'outils de cinématique inverse pour l'animation de structures articulées humaines. Les enjeux économiques actuels font que de telles structures sont généralement des personnages tridimensionnels héros de jeux pour lesquels les coûts de développements de nouveaux titres sont élevés. Cependant d'autres secteurs sont concernés par la simulation de mouvements et de postures humaines crédibles, voire médicalement réalistes, comme l'orthopédie, le sport de haut niveau, l'ergonomie et la CFAO, à travers notamment des modules dédiés au modèle humain dans les grands logiciels du secteur.

Nous donnons tout d'abord une vue d'ensemble des traitements du mouvement simulé ou capturé en identifiant des éléments qu'il est pertinent d'améliorer pour réduire leur coût de production, de traitement et d'exploitation. Le point essentiel est de permettre une meilleure ré-utilisation des mouvements. Nous rappelons ensuite les conditions de mise en oeuvre de l'une ou l'autre des techniques de cinématique inverse: analytique ou variationnelle. La résolution analytique fait appel à diverses techniques simples et efficaces dont les principales références sont rappelées. La résolution variationnelle est ensuite présentée de manière plus approfondie concernant la mise en oeuvre de priorités relatives entre les contraintes. Une méthode plus efficace de calcul des projecteurs est proposée ouvrant la voie à une plus large utilisation de l'approche variationnelle. Un exemple d'optimisation interactive de postures humaines est présenté.

## **2. Les enjeux de l'animation de personnages 3D**

Jusqu'à ces dernières années, le développement de jeux impliquant des personnages 3D s'est appuyé sur la capture de mouvements à l'aide de systèmes optiques tels que Elite, Vicon ou Motion Analysis. Leur principe consiste à disposer des marqueurs réfléchissants sur une personne puis à détecter leur position dans l'image de plusieurs caméras (infra-rouge) afin d'en déduire leur position 3D par triangulation. Bien que pénalisée par la disparition temporaire de certains marqueurs durant le mouvement, cette approche est comparativement la meilleure du point de vue de la précision obtenue, du champ couvert et de la flexibilité. Jusqu'à peu son inconvénient était de nécessiter une phase de post-traitement hors-ligne mais il existe maintenant des produits temps-réels chez Vicon et Motion Analysis. Deux autres technologies temps-réel sont disponibles à moindre coût : il s'agit des systèmes à base de capteurs magnétiques et des exo-squelettes. Bien que manquant de précision, la technologie magnétique a été utilisée pour l'animation de personnages interactifs dans des émissions de télévision du fait de sa fréquence d'acquisition et de traitement compatible avec les contraintes TV. Enfin, pour conclure le panorama des techniques de capture de mouvement, il faut noter les travaux soutenus en analyse d'image vidéo (avec une seule ou plusieurs caméras) pour capturer le mouvement de

personnes de manière totalement non-invasive. Ces techniques sont cependant encore au niveau de la recherche.

A notre connaissance la plupart des productions commerciales hors-ligne (effets spéciaux de films, jeux) ont exploité la grande qualité de l'acquisition optique [MEN 00]. Pour un jeu, ceci est possible tant que le contexte thématique du jeu permet d'identifier a priori l'ensemble des mouvements, ou combinaisons de mouvements, susceptibles d'apparaître en cours de partie (ex: le football, basket-ball, etc...). Les mouvements de base peuvent alors faire l'objet de quelques sessions de capture du mouvement d'acteurs ou de sportifs chez des professionnels disposant de l'espace et de ce matériel très coûteux. Après une phase de post-traitement et de normalisation les mouvements peuvent être enchaînés par la logique du jeu de manière ponctuelle ou cyclique. Plus récemment une nouvelle orientation consiste à proposer des environnements plus polyvalents quant à la panoplie des personnages que le joueur peut endosser et à l'étendue des savoir-faire à mettre en oeuvre, en particulier dans les mondes en-ligne. Du point de vue des mouvements requis cela élargit énormément la gamme des mouvements de base. De plus ces mouvements doivent être ajustés à la morphologie de personnages variés en taille et proportions afin de conserver à la fois le naturel et la fonction du mouvement (interaction avec l'environnement, évitement des auto-collisions). Actuellement, en recherche, on assiste à l'émergence des premiers outils permettant de généraliser un mouvement de base à différents personnages. Cet aspect est l'un des éléments à maîtriser pour améliorer la productivité des opérations de manipulations du mouvement. La suite de la présente section discute de la nécessité d'un standard de représentation du squelette humain autour duquel peut s'organiser un traitement plus efficace de l'information du mouvement.

### ***2.1. Standardisation de la mobilité du squelette humain***

On observe une grande dispersion dans les approches pour modéliser la mobilité du squelette humain mais on peut les classer en deux familles. D'une part celles qui reposent sur une identification explicite des articulations, qui les différencient selon leur nombre de degrés de mobilité et qui identifient leurs axes anatomiques. Cette famille recouvre un ensemble assez hétérogène de modèles qui diffèrent selon le nombre d'articulations considérées, selon l'orientation des repères associés à chaque articulation ainsi que parfois selon l'ordre de composition des transformations élémentaires au sein d'une articulation donnée. Ces approches peuvent être qualifiées de propriétaires puisqu'il faut adopter certaines conventions pour pouvoir contrôler la posture du modèle. Par opposition à cette approche on trouve la seconde famille de modèles qui cherchent à favoriser l'échange de mouvements en offrant un dénominateur commun le moins contraignant possible. C'est le cas de la proposition du groupe de discussion H-ANIM [ANI 99] dans laquelle toutes les articulations possèdent la même orientation commune dans la posture par défaut. Sa spécification

est faite dans le langage VRML 2.0 du fait qu'elle vise principalement les applications sur l'Internet. Dans le même ordre d'idée, et en étroite relation avec la proposition précédente, le groupe de standardisation MPEG4-SNHC a proposé un codage de l'animation du corps humain ainsi que des expressions faciales.

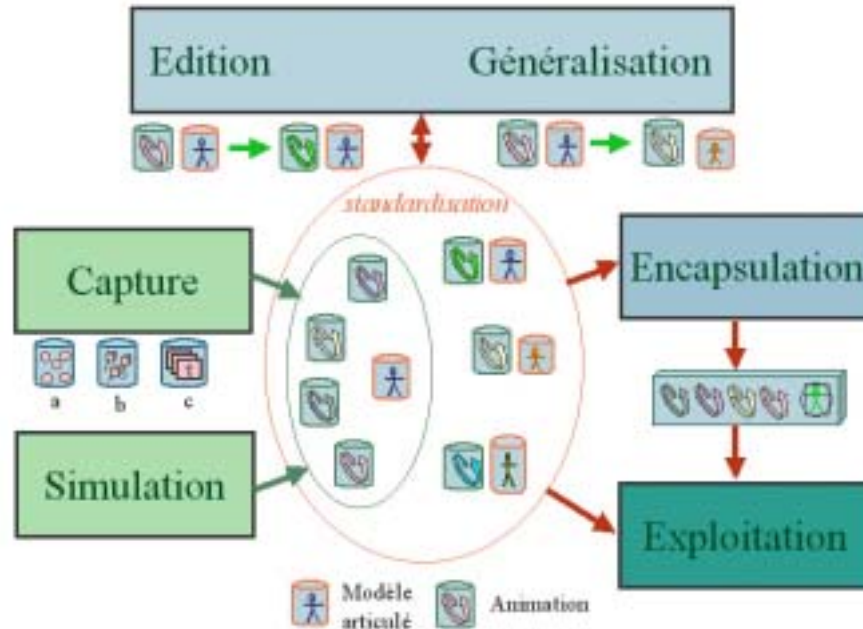
## **2.2. Vers la ré-utilisation des mouvements**

Nos travaux de recherche se basent désormais sur un modèle conforme à la spécification H-ANIM (disponible sur l'Internet [ANI99]). Cette spécification définit l'ensemble des articulations possibles sans imposer qu'un squelette donné les contiennent toutes, ce qui permet d'étudier la possibilité de gérer plusieurs niveaux de détails dans la mobilité du squelette (ou *niveaux de mobilité*).

Dans ce contexte, un premier problème intéressant est de maintenir les caractéristiques spatiales d'un mouvement donné pour différents niveaux de mobilité d'un modèle humain. D'une façon générale si l'on veut qu'un mouvement d'un modèle A puisse être joué sur un modèle B, il ne suffit pas que ces deux modèles soient simplement conformes à la spécification H-ANIM. Cette condition nécessaire va seulement garantir une invariance de l'expressivité si le mouvement de A est joué sans aucune adaptation par B. Les gestes sont qualitativement les mêmes dans l'espace mais les positions atteintes sont différentes. Ceci peut avoir des conséquences importantes en terme d'interaction du personnage B avec l'environnement ou avec lui-même. Il faut donc mettre au point des outils d'édition du mouvement qui permettent non seulement d'adapter un mouvement pour différents niveaux de mobilité d'un personnage mais aussi de généraliser un mouvement d'un personnage A à un personnage B de taille et de proportions différentes.

Cela posé comme objectif, apparaît une difficulté singulièrement importante, celle d'identifier les caractéristiques spatiales, ou contraintes, que l'on désire préserver au cours de l'adaptation du mouvement. Actuellement plusieurs travaux laissent cette décision à l'utilisateur à travers une interface graphique lui permettant de spécifier la nature de ces contraintes ainsi que les fenêtres temporelles sur lesquelles elles doivent être prises en compte [POP 99],[LEE 99],[MON 00]. Une difficulté supplémentaire réside dans l'importance relative des contraintes. Dès que plusieurs contraintes interviennent elles sont généralement en concurrence dans le processus d'adaptation du mouvement. Il est donc souhaitable de disposer d'une approche d'adaptation qui permette de relativiser l'importance des contraintes entre elles. Dans la seconde partie de l'article, nous proposons une nouvelle méthode de cinématique inverse variationnelle dans laquelle il est possible d'associer une priorité stricte à une contrainte.

La figure 1 rassemble les éléments de production (capture, simulation), de manipulation (édition, généralisation) et d'exploitation du mouvement humain. Ce schéma est complété par un module d'encapsulation, qui rassemble et structure les mouvements appartenant à une même famille (ex: atteindre un point avec la main, s'asseoir sur une chaise de différentes hauteurs, marcher à différentes vitesses).



**Figure 1.** Ré-utilisation du mouvement humain: Les procédés de production de mouvement sont essentiellement la capture optique (a), magnétique (b), et, plus marginalement, la capture basée sur les images (c). Par ailleurs, la simulation requiert un savoir-faire important. Des algorithmes d'édition ou de généralisation peuvent élargir la base de données des mouvements à moindre coût surtout si le modèle articulé humain est standardisé. Outre l'exploitation temps-réel des mouvements bruts ou édités, l'encapsulation doit permettre de rassembler des mouvements d'un même type sous une forme normalisée indépendante des individus.

On distingue deux phases dans la ré-utilisation des mouvements: tout d'abord une phase interactive de spécification et d'ajustement des contraintes et ensuite une exploitation automatique. Pour être pleinement efficace, l'identification des contraintes doit être automatisée autant que possible. Il est probable que des productions haut de gamme comme des scènes de premier plan requièrent toujours une capture spécifique du mouvement. La ré-utilisation peut répondre aux autres besoins avec des exigences de qualité réduites certes mais à un bien moindre coût (en temps, équipement, espace, post-traitement). On peut d'ailleurs déjà noter l'apparition sur le marché de bibliothèques de mouvement bruts sous forme de trajectoires des marqueurs optiques.

Dans les sections suivantes nous nous concentrons sur les techniques de cinématique inverse analytiques et variationnelles pour le contrôle de la posture d'un modèle humain.

### 3. Techniques de cinématique inverse

Cette section s'intéresse au problème général du positionnement d'une partie du corps dans l'espace cartésien en recherchant une posture dans l'espace articulaire. La richesse de l'information cartésienne disponible, c'est à dire le nombre de contraintes, détermine l'approche retenue. Si celle-ci est importante, une résolution analytique rapide, non ambiguë et efficace peut être envisagée. Par contre, pour un faible nombre de contraintes, le problème devient sous-déterminé et il existe un nombre infini de solutions (cas redondant). Dans ce contexte une approche variationnelle s'impose.

Rappelons tout d'abord les dimensions en présence dans le cas du modèle humain (ou de tout personnage ayant un squelette similaire). L'espace articulaire a une dimension, notée  $N$ , de l'ordre de trente à quarante pour un squelette avec une colonne vertébrale simplifiée et sans les mains. Ces dernières rajoutent à elles seules environ cinquante autres degrés de mobilité. De l'autre côté l'ensemble des contraintes a une dimension notée  $M$ . Chaque contrainte contrôle de une à trois dimensions de la position et/ou de l'orientation d'une partie du corps appelée dorénavant *effecteur*. Le mécanisme articulé est redondant si le nombre de degrés de liberté  $N$  est supérieur à la dimension des contraintes  $M$ .

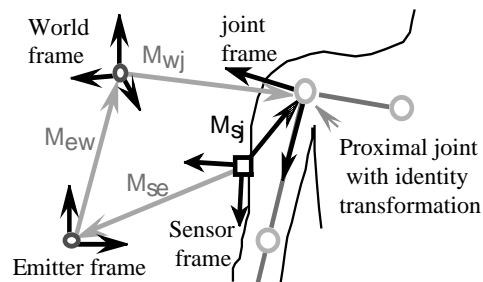
#### 3.1. Contexte dans lesquels la résolution analytique est possible

Dans un contexte non-redondant ou faiblement redondant et pour un faible nombre de degrés de mobilités, il est possible d'obtenir l'expression analytique des valeurs articulaires en fonction des dimensions contraintes. C'est l'approche classique en Robotique pour le contrôle des bras articulés jusqu'à six degrés de mobilité. D'une manière générale on serait tenté de dire que la solution analytique est indépendante de l'état courant du système. Cependant, l'existence d'une solution ne veut pas dire qu'il existe un chemin direct entre l'état courant et la solution. Cela vient des limites articulaires qui peuvent imposer une reconfiguration du système articulé avant d'atteindre la solution. Ce problème supplémentaire a été traité dans [BOR 86] et est également disponible de manière standard dans les grands logiciels de CAO robotique.

En ce qui concerne le modèle humain, de nombreux auteurs ont traité le cas particulier de la jambe et du bras [KOR 86], [TOL 96]. Dans un cas comme dans l'autre il s'agit de positionner le poignet (resp. la cheville) par rapport à l'épaule (resp. la hanche). D'une part nous avons les trois degrés de liberté de l'épaule auquel on ajoute le flexion du coude, soit quatre degrés de mobilité articulaire. D'autre part nous désirons contrôler la position d'une articulation, soit trois degrés de contrainte cartésienne. Il reste un degré de contrainte à préciser pour déterminer complètement la solution, à savoir la rotation autour de l'axe reliant les deux articulations. Le logiciel IKAN de l'Université de Pennsylvanie résoud ce problème et peut être trouvé sur l'Internet [IKAN 97].



**Figure 2.** Disposition des capteurs magnétiques lors d'une démonstration publique d'un programme de combat contre un personnage virtuel 3D apparaissant sur l'écran faisant face au joueur (travaux de Luc Emering [EME 00] et [MOL 99]).



**Figure 3.** Chaîne des transformations permettant de calculer la transformation rigide  $M_{sj}$  à partir de la mesure dans la posture de calibration [MOL 96].

Une autre méthode de résolution analytique a été employée pour la capture temps-réel basée sur la mesure de capteurs magnétiques. Par exemple, [MOL 96] exploite une mesure d'orientation pour chaque segment du corps (figure 2). Cette méthode procède en deux temps: tout d'abord une posture de calibration est adoptée permettant de calculer la transformation rigide  $M_{sj}$  entre le capteur et le repère de l'articulation associée (figure 3). Ensuite, il suffit d'effectuer un chaînage de transformations constantes et de la transformation mesurée pour obtenir la transformation locale de l'articulation. Celle-ci peut alors être convertie en une séquence d'angles d'Euler ou dans tout autre paramétrage du corps articulé. Plus récemment [MOL 99] propose une méthode pour distribuer une mesure sur plusieurs

articulations. Cette possibilité a été utilisée pour l'animation de différents segments de la colonne vertébrale.

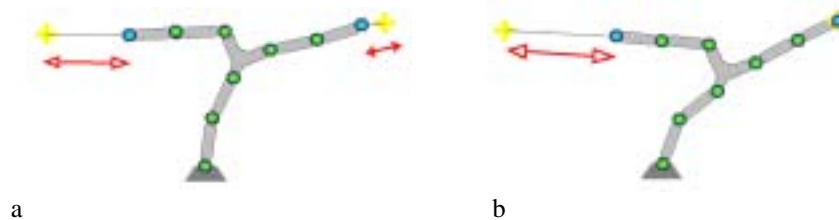
En résumé, la résolution analytique requiert des simplifications importantes telles que le découpage du squelette en sous-chaines ce qui rend cette approche assez laborieuse et rigide. En contre-partie, la simplicité des algorithmes permet un usage temps-réel indispensable pour certaines applications. Un autre intérêt réside dans l'initialisation d'algorithmes plus coûteux comme dans [LEE 99]

### 3.3. Cinématique inverse variationnelle

Rappelons en premier lieu que cette technique repose sur la linéarisation du système autour de l'état courant. Le domaine de validité de la solution est le voisinage de cet état; il faut donc procéder par petites variations de l'état en direction du but. On voit alors que la convergence vers la solution finale dépend énormément de l'état initial. De plus il est très difficile d'estimer quelles sont les autres solutions du problème.

#### 3.3.1. Pondération ou priorité ?

La cinématique inverse variationnelle se prête bien aux cas redondants. Si plusieurs contraintes agissent simultanément, deux approches sont possibles pour relativiser leur influence respective: il s'agit soit de pondérer chaque contrainte (Figure 4.a), soit de leur attribuer une priorité (Figure 4.b). La première solution est connue depuis longtemps, elle présente l'avantage de la simplicité [PHI 90]. Cependant, à moins d'attribuer un poids infini à une contrainte donnée il n'est pas possible d'imposer sa réalisation par rapport aux autres. C'est pourquoi nous avons travaillé sur l'approche complémentaire des priorités. Dans la suite de cette section nous détaillons tout d'abord la formule générale et l'approche à deux niveaux de priorité de [HAN81] avant d'introduire la formulation récursive de l'architecture à plusieurs niveaux de priorités.



**Figure 4.** Solution avec pondération (a) ou priorité (b)

#### 3.3.2. Architectures à deux niveaux de priorités

Le Jacobien  $\mathbf{J}$  rassemble les dérivées partielles des contraintes  $\mathbf{x}$  par rapports aux degrés de libertés  $\boldsymbol{\theta}$  : c'est une matrice  $M \times N$ . Son calcul dépend du paramétrage retenu pour les articulations [WAT92],[BAE01]. Sa pseudo-inverse  $\mathbf{J}^+$  fournit la

variation  $\Delta\theta$  de *norme minimale* pour une variation désirée  $\Delta\mathbf{x}$ . La forme générale de la solution est:

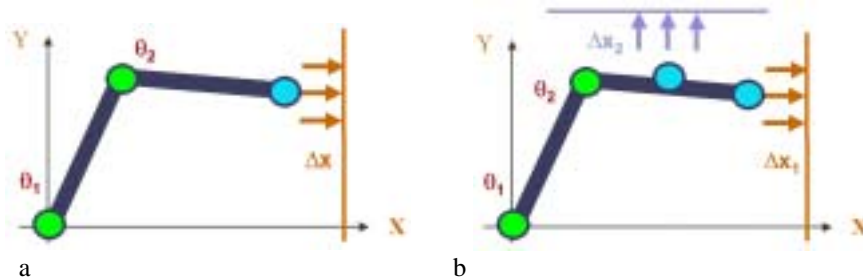
$$\Delta\theta = J^+ \Delta\mathbf{x} + P_{N(J)} \mathbf{z} \quad [1]$$

où  $P_{N(J)}$  est l'opérateur de Projection sur le Noyau de  $\mathbf{J}$ , noté  $N(J)$ .

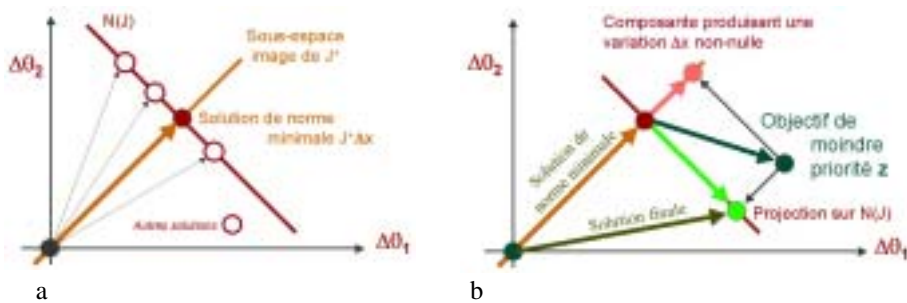
On a :

$$P_{N(J)} = \mathbf{I} - \mathbf{J} \mathbf{J}^+ \quad [2]$$

Le vecteur  $\mathbf{z}$  est en général le gradient d'une fonction de coût  $g(\theta)$  exprimée dans l'espace articulaire. Par exemple, dans [MON 00],  $\Delta\mathbf{x}$  représente un déplacement temporaire désiré pour une partie du corps; simultanément  $\mathbf{z}$  attire la posture courante vers la posture définie par le mouvement initial à l'aide d'un terme proportionnel à l'écart.



**Figure 5.** Deux exemples: une contrainte cartésienne à une dimension (a), deux contraintes cartésiennes à une dimension chacune (b)



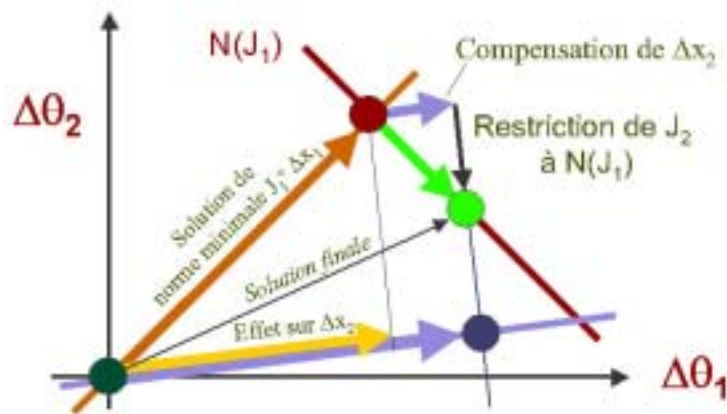
**Figure 6.** Espace image de  $J^+$  et espace Noyau de  $J$  (a), projection du vecteur  $\mathbf{z}$  sur le Noyau de  $J$  (b)

Pour mieux comprendre le rôle de l'opérateur de projection  $P_{N(J)}$  nous présentons maintenant deux exemples très simples (figure 5). Dans l'exemple de la Figure 5a une chaîne possède deux degrés de liberté en rotation pour contrôler l'effecteur situé

en fin de chaîne selon la dimension X seulement. Ce système est donc redondant. La contrainte étant de dimension 1 son espace image par  $J^+$  est également de dimension 1 ce qui explique le sous-espace image de dimension 1 dans le plan des variations articulaires (figure 6a). La pseudo-inverse  $J^+$  associe à toute variation désirée  $\Delta x$  une variation correspondante  $\Delta \theta$  de norme minimale. Les variations articulaires appartenant au sous-espace complémentaire, appelé le Noyau de J, produisent une variation  $\Delta x$  nulle (d'où son nom de *Null space* en anglais). Si on décompose un vecteur  $z$  selon ces deux sous-espaces, on obtient une composante qui perturbe la solution obtenue avec  $J^+$  tandis que l'autre appartient au noyau  $N(J)$ . C'est cette seconde composante (figure 6b) qui est obtenue avec l'opérateur de projection  $P_{N(J)}$ .

Un contexte qui nous intéresse plus particulièrement est celui où  $z$  et  $\Delta x$  ne sont pas indépendants. En effet, nous désirons pouvoir contraindre la position de plusieurs effecteurs simultanément comme le montre la figure 5b où chaque effecteur est contraint selon une seule dimension. On voit bien dans cette figure que les deux effecteurs ne peuvent pas atteindre leur but respectif simultanément, c'est pourquoi on veut pouvoir donner une priorité supérieure à la contrainte  $\Delta x_1$  par rapport à la contrainte  $\Delta x_2$ . Ce cas est résolu dans [HAN81] ; la formule générale permettant de calculer  $z$  est donnée par:

$$z = [J_2(I - J_1^+ J_1)]^+ (\Delta x_2 - J_2(J_1^+ \Delta x_1)) \quad [3]$$

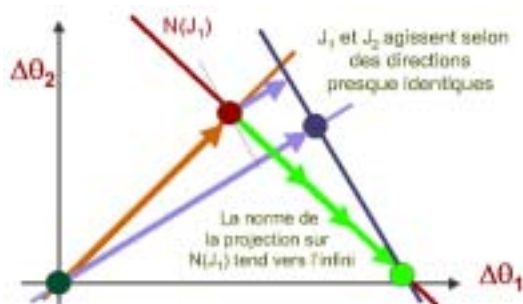


**Figure 7.** Construction de la solution lorsque les contraintes sont dépendantes

Le sens de cette formule apparaît mieux avec la figure 7. Tout d'abord le terme de droite est une compensation de la contrainte de moindre priorité. En effet, comme dans la figure 6a, la pseudo-inverse  $J_1^+$  associée à la contrainte prioritaire fournit une variation de norme minimale  $J_1^+ \Delta x_1$ . Cette variation a une influence sur l'autre contrainte, influence que nous pouvons quantifier en la projetant sur l'espace image

de  $J_2^+$  (vecteur *Effet sur  $\Delta x_2$* ). La figure montre le résultat de la compensation de  $\Delta x_2$ . Dans la formule [3] la variation compensée de  $\Delta x_2$  est ramenée dans l'espace des variations articulaires par la pseudo-inverse de la restriction de  $J_2$  au Noyau de  $J_1$  (obtenue en multipliant  $J_2$  par  $P_{N(J_1)}$ ). En d'autres termes, cette pseudo-inverse ramène une variation articulaire appartenant au noyau de  $J_1$ , plus précisément celle qui, projetée sur l'espace image de  $J_2^+$ , réalise la compensation de  $\Delta x_2$ . Ceci explique la projection oblique sur  $N(J_1)$  dans la figure 7. La solution finale accumule simplement la solution prioritaire et la contribution calculée pour  $z$  qu'il n'est plus nécessaire de projeter sur  $N(J_1)$  car, par construction, elle appartient déjà à cet espace.

La formule [3] présente cependant une singularité, appelée singularité algorithmique, qui apparaît lorsque les deux contraintes agissent dans la même direction. Dans ce contexte la norme de la solution calculée pour  $z$  croît vers l'infini (figure 8). Ce problème peut être traité de manière élégante par une technique de régularisation limitant la norme de  $z$ . Pour cela, un paramètre  $\lambda$  défini par l'utilisateur, amortit le comportement des valeurs singulières d'un jacobien  $J$  dans le voisinage de la singularité [MAC 90] (détails en annexe I). Dans la suite de cet article nous notons ce type de pseudo-inverse  $J^{+\lambda}$  pour le distinguer des pseudo-inverses classiques qui sont toujours requises pour calculer les projecteurs  $P_{N(J)}$ .



**Figure 8.** Singularité algorithmique de la solution [3]

### 3.3.3. Architecture à plusieurs niveaux de priorités

Les concepts détaillés à la section précédente se généralisent à un nombre arbitraire de priorité [SIC 91]. Pour mieux présenter cette généralisation, nous pouvons réécrire la formule [3] sous une forme faisant apparaître explicitement la solution prioritaire  $\Delta\theta_1$  et la contribution de moindre priorité  $\Delta\theta_2$ :

$$\Delta\theta_1 = J_1^{+\lambda} \Delta x_1$$

$$\Delta\theta_2 = (J_2 P_{N(J_1)})^{+\lambda} (\Delta x_2 - J_2 \Delta\theta_1)$$

Pour achever la généralisation à plus de deux niveaux, nous devons introduire le *Jacobien augmenté de niveau k*  $J_k^A$  qui empile tous les Jacobiens partiels  $J_k$  du niveau 1 jusqu'au niveau k. Par exemple, un Jacobien partiel peut contrôler une position et/ou une orientation d'effecteur [WAT92], tandis qu'un autre Jacobien partiel contraint la position du centre de masse [BOU97].

Le Jacobien augmenté permet de construire le projecteur sur le Noyau  $N(J_k^A)$  de l'ensemble des contraintes prioritaires jusqu'au niveau k inclus. La contrainte de moindre priorité de niveau k+1, est réalisée sur la restriction de  $J_{k+1}$  au Noyau  $N(J_k^A)$ . L'expression des solutions  $\Delta\theta_k$  devient vite complexe et il est préférable d'exprimer la solution générale sous forme d'une boucle accumulant les solutions partielles, en commençant par la plus haute priorité. On a  $\Delta\theta_0 = 0$  et  $P_{N(J_0^A)} = I_n$

pour  $k=1$  jusqu'à  $p$  :

$$\Delta\theta_k = (J_k P_{N(J_{k-1}^A)})^{+\lambda_k} (\Delta x_k - J_k \Delta\theta_{k-1})$$

$$P_{N(J_k^A)} = I_n - J_k^{A+} J_k^A$$

Dans l'approche de [SIC 91] le projecteur est recalculé complètement pour chaque niveau de priorité ce qui induit un coût calcul en  $O(p^2)$ . Nous proposons un calcul récursif qui permet de réduire le coût à l'ordre  $O(p)$  en adoptant la formule [BAE 98]:

$$P_{N(J_k^A)} = P_{N(J_{k-1}^A)} - (J_k P_{N(J_{k-1}^A)})^+ (J_k P_{N(J_{k-1}^A)})$$

### 3.3.4. Résultats

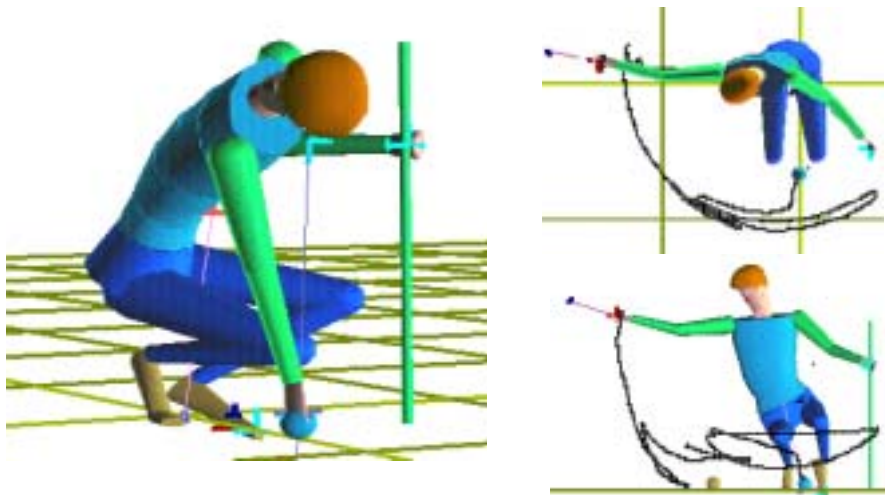
Notre évaluation de la cinématique inverse avec un nombre arbitraire de niveaux de priorités s'est concentrée sur l'édition interactive de postures humaines. Dans l'exemple de la figure 9 cinq à six contraintes simultanées ont été définies par l'utilisateur pour une structure articulée comprenant environ quarante degrés de liberté. Toutes les contraintes recrutent tous les degrés de liberté pour leur réalisation. Elles sont listées dans la table 1 avec leur but et le rang qu'elles occupent (correspondant à l'indice des formules données plus haut). Comme on peut le remarquer certaines contraintes sont au même rang ce qui revient à obtenir une solution de compromis, éventuellement avec pondération, à ce niveau de priorité.

La performance de l'algorithme est compatible avec un travail interactif au cours duquel l'utilisateur peut à tout moment modifier les caractéristiques d'une contrainte comme l'activation, la position du but, le nombre de dimensions contrôlées, la priorité et la pondération. Les figures de droite montrent en particulier la trace laissée par la main droite en essayant de suivre la position associée à son but. Cela permet d'avoir une bonne idée de l'espace que peut atteindre ce personnage dans ce

contexte. La dernière ligne du tableau mentionne également plusieurs contraintes de faible priorité qui ont été activées séquentiellement par une simple métaphore "attraper et tirer" avec la souris tant qu'un bouton est appuyé. Cette possibilité est très pratique pour l'ajustement local d'une posture.

Effecteur	Contrainte	Rang
Pied gauche	contact sol	1
Direction du regard	vers la sphère	1
Centre de la main droite	atteindre la sphère	1
Centre de masse [BOU 97]	distribution des masses	2
Centre de la main gauche	tenir la barre verticale	3
Bassin, coude, genou	ajustements temporaires	4

**Table 1.** Liste des effecteurs, des contraintes associées et de leur rang



**Figure 9.** Postures résultant des contraintes à priorités multiples.

#### 4. Conclusion

Les premiers résultats en édition interactive de postures nous ont montré la pertinence de la cinématique inverse variationnelle pour le contrôle de modèles humains. Il reste certes des problèmes à résoudre en particulier concernant la gestion des minima locaux qui peut bloquer l'évolution de la convergence. Dans ces cas, on

peut envisager d'exploiter la cinématique inverse analytique pour trouver une solution grossière et sortir de tels minima.

Sur un autre plan, plus humain, la prise en compte automatique de critères de confort ou de fatigue des postures obtenues est encore mal maîtrisée: comment intégrer cet aspect à un niveau de priorité variable ? Cette question reste très ouverte.

Enfin, malgré son coût calcul élevé avec une décomposition en valeur singulière par niveau de priorité (nous utilisons la décomposition SVD de [PRE 92]), l'algorithme des priorités multiples offre un cadre très souple pour résoudre de nombreux problèmes d'édition de postures complexes. De plus, comme il ne dépend que de l'état courant on peut envisager de l'utiliser pour le contrôle réactif du mouvement. Actuellement nous évaluons la continuité d'un mouvement édité à l'aide de contraintes temporaires et les premiers résultats sont très encourageants pour en faire une méthode de généralisation de mouvements. Le coût calcul est de l'ordre du dixième de seconde par échantillon de mouvement sur une SGI ONYX2 pour un corps d'une cinquantaine de degrés de liberté et environ une vingtaine d'effecteurs contraints en position (l'édition de mouvement requiert d'ajouter beaucoup d'effecteurs sur une grande profondeur de priorités). L'évolution technologique des plate-formes de jeux étant extrêmement rapide il est tout à fait envisageable de voir cette technique à l'oeuvre dans les prochaines années pour l'adaptation en-ligne de mouvements de base.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et le laboratoire d'infographie pour le soutien financier et l'environnement de travail. Nous désirons également remercier nos collègues Luc Emering et Tom Molet pour l'illustration des travaux de capture de mouvement, ainsi que le FNSRS pour le financement du projet n°20-53809.98/1 dont des travaux relatifs à la cinématique inverse variationnelle ont été présentés dans la seconde partie de l'article.

#### **5. Bibliographie**

- [ANI 99] ROEHL B., « H-ANIM Specification for a standard humanoid Version 1.1 », Humanoid Animation Working Group, <http://ece.uwaterloo.ca/~h-anim/spec1.1/>, Updated August 3, 1999.
- [BAE 98] BAERLOCHER P., BOULIC R., « Task-Priority Formulations for the Kinematic Control of Highly Redundant Articulated Structures », *Proc. of IEEE IROS'98*, pp 323-329, November 1998
- [BAE 01] BAERLOCHER P., « Inverse Kinematics Techniques for the Interactive Posture Control of Articulated Figures », Thèse de doctorat ès Sciences, discipline informatique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en préparation.

- [BOU 97] BOULIC R., MAS R., THALMANN D., « Complex Character Positioning Based on a Compatible Flow Model of Multiple Supports », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 3, n° 3, pp. 245-261, 1997
- [BOR 86] BORREL P., « Contribution à la modélisation géométrique des robots manipulateurs. Application à la conception assistée par ordinateur », Thèse de Doctorat d'Etat, mention Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 11 Juillet 1986
- [EME 00] EMERING L., BOULIC R., THALMANN D., « Conferring human action recognition skills to life-like agents », *Journal of Applied Artificial Intelligence*, Special Issue on Animated Interface Agents, vol 13, n°4-5, pp 539-565, June-August 1999
- [HAN 81] HANAFUSA H., YOSHIKAWA T., NAKAMURA Y., «Analysis and Control of Articulated Robot with Redundancy », *Proc. Of IFAC*, 1981, vol. 4, pp 1927-1932
- [IKAN 97] « IKAN: Inverse Kinematics using ANalytical Methods », <http://hms.upenn.edu/software/ik/ik.html>, Center for Human Modelling and Simulation, University of Pennsylvania, 1997
- [KOR 86] KOREIN J.U., *A Geometric Investigation of Reach*, Cambridge MA, MIT Press, 1985
- [LEE 99] LEE J.S., SHIN S.Y., « A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human-Like Figures », *Proc. of SIGGRAPH'99*, Los Angeles 1999
- [MAC 90] MACIEJEWSKI A.A. « Dealing with Ill-Conditioned Equations of Motion for Articulated Figures », *IEEE CGA*, vol 10, n°3, pp 63-71, 1990
- [MEN 00] MENACHE A., *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*, ISBN 0-12-490630-3, Morgan Kaufmann, 2000
- [MOL 96] MOLET T. , BOULIC R., THALMANN D., « A Real-Time Anatomical Converter for Human Motion Capture », *7th EUROGRAPHICS Int. Workshop on Computer Animation and Simulation*, Poitier, France, G. Hégron and R. Boulic eds., ISBN 3-211-828-850, Springer-Verlag Wien 1996
- [MOL 99] MOLET T., BOULIC R., THALMANN D., « Human Motion Capture Driven by Orientation Measurements », *MIT Presence*, vol 8, n°2, pp 187-203, April 1999
- [MON 00] MONZANI J.S., BAERLOCHER P., BOULIC R., THALMANN D., « Using an Intermediate Skeleton and Inverse Kinematics for Motion Retargeting », *Proc. of Eurographics'2000*, Interlaken 2000
- [PHI 90] PHILIPS C.B., ZHAO J., BADLER N., « Interactive Real-Time Articulated Figure Manipulation Using Multiple Kinematic Constraints », *Computer Graphics*, vol 24, n°2, pp 245-250, 1990
- [POP 99] POPOVIC Z., WITKIN A., "Physically Based Motion Transformation", *Proc. of SIGGRAPH'99*, Los Angeles, 1999

- [PRE 92] PRESS W.H., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T., FLANNERY B.P., *Numerical Recipes in C*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1992
- [SIC 91] SICILIANO B., SLOTINE J.-J., « A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotic Systems », *Proc. of ICAR'91*, vol 2, pp 1211-1215, ISBN 0-7803-0078-5, 1991
- [TOL 96] TOLANI D., BADLER N.I., « Real-Time Inverse Kinematics of the Human Arm », *Presence, Teleoperators, and Virtual Environments*, vol 5, n°4, 393-401, 1996
- [WAT92] WATT A., WATT M. *Advanced Animation and Rendering Techniques*, Addison-Wesley, ACM Press, 1992

## 6. Biographie

*Ronan Boulic est adjoint scientifique au laboratoire d'Infographie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Il est habilité à diriger des recherches et chargé de cours. Ses activités de recherche portent sur le contrôle du mouvement et l'optimisation de postures des systèmes articulés complexes tels que les modèles humains. Les domaines d'applications sont l'animation de personnages, l'ergonomie, l'orthopédie, la réalité virtuelle et la vie artificielle.*

*Paolo Baerlocher est doctorant au laboratoire d'Infographie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ses travaux traitent des méthodes de cinématique inverse variationnelle avec garantie de priorité relative entre contraintes.*

## Annexe I

### Calcul de la pseudo-inverse amortie $J^{+\lambda}$ d'un Jacobien $J$ [MAC90]

La décomposition en valeurs singulières de  $J$ , de dimension  $m \times n$ , est [PRE92] :

$$J = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad r \leq m$$

Où  $r$  est le rang du Jacobien,  $\sigma_i$  sont les valeurs singulières (strictement positives),  $\{u_i\}$  et  $\{v_i\}$  sont des bases respectivement de l'espace image de  $J$  et de l'espace complémentaire du noyau de  $J$ . L'expression de la pseudo-inverse amortie pour un facteur  $\lambda$  donné est alors:

$$J^{+\lambda} = \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} v_i u_i^T$$

Lorsque  $\lambda$  vaut zéro on retrouve l'expression de la pseudo-inverse  $J^+$  contenant un terme en  $1/\sigma_i$  qui tend vers l'infini lorsqu'une valeur singulière devient faible (voisinage d'une singularité). Par contre lorsque  $\lambda$  est supérieur à zéro, le terme d'amortissement tend continuellement vers zéro dans le même contexte.