

clavicule et l'omoplate humaines autorisent des mouvements plus complexes, tel le haussement d'épaules.

D'autre part, un ordinateur calcule plus difficilement le mouvement des organismes que celui des objets inertes. Pour ces derniers, des équations issues de lois physiques suffisent. Ainsi, le mouvement d'un ballon qui dévale une pente ne dépend que des forces auxquelles il est soumis (la gravité, les frottements contre le sol ou dans l'air...) et des conditions initiales. Les êtres vivants, en revanche, sont animés par des sources internes d'énergie. Pour simuler leur comportement, nous avons mis au point un programme générateur de commandes musculaires, nommé système de contrôle : il calcule les couples de forces nécessaires au déplacement de chaque articulation pour permettre au personnage d'accomplir les actions choisies, et les applique à ces articulations. Pour la course, par exemple, le système de contrôle détermine les couples nécessaires pour ramener la jambe vers

l'avant avant le contact avec le sol, afin que le coureur ne trébuche pas.

Nous avons mis au point des systèmes de contrôle pour des activités physiques telles la course, le plongeon, la bicyclette ou le saut de cheval en gymnastique. Bien que les mouvements liés à ces activités soient différents, nos programmes fonctionnent globalement de la même façon, et ils sont construits à partir du même ensemble de composants.

Le fonctionnement du système de contrôle

Un système de contrôle utilise un «automate d'états», qui détermine ce que chaque articulation doit faire à chaque instant, puis, tel un chef d'orchestre, assure que les articulations exécutent ces fonctions au moment approprié. La course, par exemple, est une activité cyclique où alternent une phase de soutien, lorsqu'une jambe sert d'appui, et une phase d'envol, quand aucun des deux pieds n'est en

contact avec le sol. Pendant la phase de soutien, la cheville, le genou et la hanche, du côté de la jambe en contact avec le sol, doivent assurer le soutien et l'équilibre. Quand cette même jambe est en l'air, la hanche a une fonction différente, celle de faire osciller la jambe vers l'avant pour préparer le contact suivant. L'automate d'états sélectionne, parmi les différents rôles de la hanche, l'action appropriée pour la phase en cours.

Ensuite, à chaque phase du mouvement sont associées des lois de contrôle, équations qui représentent la manière dont chaque segment corporel doit bouger pour accomplir le mouvement prévu, avec lesquelles l'ordinateur calcule les angles nécessaires pour chacune des 30 articulations du corps humain virtuel. Pour déplacer les articulations vers les positions désirées, le système de contrôle calcule ensuite les couples de force adaptés grâce à des équations qui reproduisent la fonction motrice des muscles.

Trois techniques d'animation

L'interpolation entre positions clés



Everett Collection



Toy Story, film des studios Disney, a été animé surtout par interpolation : les animateurs spécifiaient la position des objets, et un ordinateur créait les images manquantes par interpolation automatique.



La captation du mouvement



Microsoft Motion Capture Group



C'est la technique la plus utilisée pour les animations publicitaires. Un ordinateur «rediffuse» des données saisies lors du mouvement de sujets réels pour animer un personnage de synthèse.

La simulation



James O'Brien et Victor Zordan

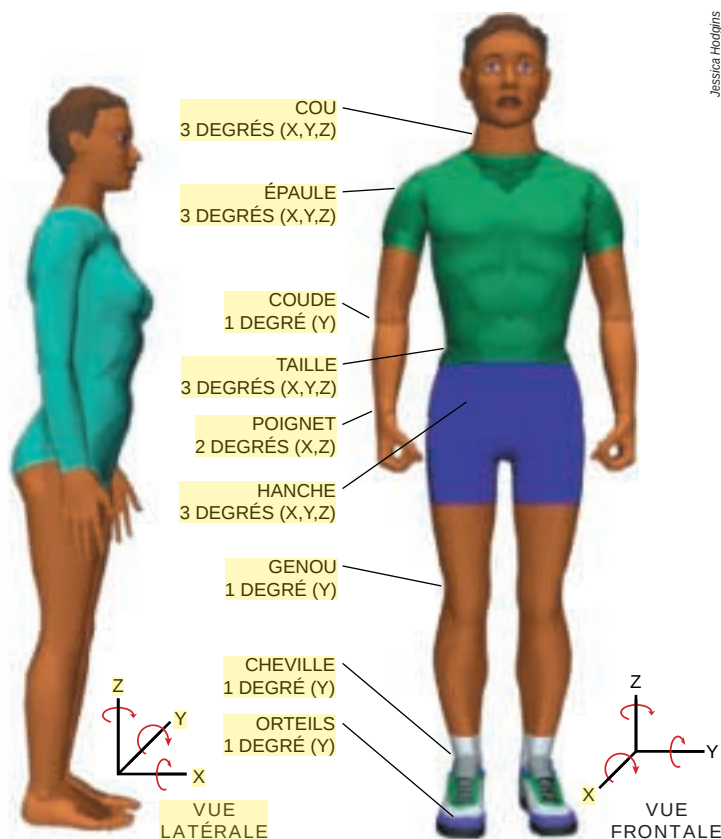
L'ordinateur utilise les lois de la physique pour synthétiser les mouvements de personnes et d'objets virtuels.

Pour simplifier l'écriture des lois de contrôle, nous utilisons souvent des synergies de plusieurs segments corporels. Ainsi les articulations de la cheville et du genou du coureur simulé coopèrent-elles dans la poussée sur le sol pendant la phase de soutien. Lorsque c'est possible, les lois de contrôle utilisent aussi les comportements passifs du corps pour obtenir l'effet désiré : nous supposons que le corps humain est une machine efficace et, par conséquent, qu'il minimise sa consommation d'énergie en se fondant le plus possible sur des comportements passifs. Par exemple, pendant la phase de soutien, le genou du coureur se comporte comme un ressort, qui stocke de l'énergie lorsqu'il est comprimé et la libère lorsqu'il se détend.

Les mouvements sont

mieux décrits lorsque bougent aussi des segments qui ne travaillent pas au cours de phases particulières, pour réduire les perturbations provoquées par le déplacement des autres segments. Dans le cas de la simulation de la course, les lois de contrôle font osciller les bras de l'athlète en opposition de phase par rapport aux jambes, afin de réduire les balancements du corps.

La technique de la simulation a deux avantages par rapport à l'interpolation entre positions clés et à la captation des mouvements. D'abord, les simulations sont plus générales : les mêmes lois décrivent des mouvements légèrement différents ; par exemple, les mêmes techniques de simulation animent une course à quatre mètres par seconde et une course à cinq mètres par seconde. Avec les autres techniques d'animation, le mouvement perd de son naturel si l'on se contente d'accélérer ou de ralentir la séquence. Ensuite les simulations, en temps réel, peuvent être interactives, qualité importante pour les environnements virtuels et les jeux vidéo, où des personnages doivent réagir aux actions de per-



2. LES MODÈLES INFORMATIQUES DU CORPS humain sont composés de segments corporels rigides, reliés par des articulations auxquelles on assigne un, deux ou trois degrés de liberté selon les axes de coordonnées x, y et z.

sonnes réelles. En revanche, les animations par interpolation entre positions clés ou à partir de captation de mouvements reproduisent seulement des mouvements déjà calculés, et stockés dans la mémoire de l'ordinateur.

La simulation reste toutefois d'emploi difficile, et elle n'est exécutable que par des ordinateurs puissants. Afin de faciliter la programmation, nous avons mis au point une banque de sous-programmes qui peuvent être associés de différentes façons pour créer de nouveaux mouvements : l'ordinateur combine quatre systèmes de contrôle fondamentaux (sauter, tourner en l'air, atterrir et s'équilibrer) pour engendrer des figures plus complexes, tels les sauts périlleux ou les plongeurs.

L'adaptation de la simulation à la morphologie

Nous explorons aussi l'adaptation automatique à d'autres personnages des comportements déjà mis en équations. Les systèmes de contrôle sont adaptés aux propriétés dynamiques particulières d'un modèle donné et, en général, le système mis au point

pour un adulte ne fonctionne pas pour un enfant. Nous étudions des techniques d'optimisation et d'ajustement des systèmes de contrôle qui permettent la modification d'un comportement existant et son adaptation à un autre personnage dont les caractéristiques physiques sont différentes de celles du personnage initialement étudié. Ainsi, nous avons adapté à une femme et à un enfant de quatre ans notre système de contrôle de la course conçu pour un homme, en prenant en compte les différences des masses des segments corporels de ces trois modèles, ainsi que de nombreux autres paramètres.

Ces dernières années, des informaticiens ont cherché des méthodes, fondées sur la simulation, qui engendrent des mouvements sans l'éla-

boration préalable d'un système de contrôle. La synthèse de mouvements peut, par exemple, être traitée comme un problème d'optimisation de trajectoires : on traite alors les équations du mouvement et certaines caractéristiques importantes de l'action désirée comme des contraintes, et l'on recherche le mouvement qui satisfait ces contraintes en dépensant l'énergie minimale. Ainsi, dans une simulation de saut, les contraintes seraient que le personnage parte du sol, qu'il soit ensuite en l'air et qu'il revienne au sol. Le logiciel d'optimisation déterminerait alors automatiquement que le personnage plie les genoux avant de sauter pour obtenir la hauteur maximale en dépensant le minimum d'énergie.

D'autres équipes confient à l'ordinateur la recherche du système de contrôle parmi toutes les possibilités. Dans le cas le plus général, cette technique doit déterminer comment un personnage pourrait bouger de tout état initial possible à tout état final possible. Comme cette méthode résout un problème plus général que celui de l'identification d'une trajectoire optimale unique d'un point de départ donné