

atomes dans le cristal et de l'angle avec lequel les rayons X frappent le réseau. Eli Yablenovitch, de l'Université de Los Angeles, a eu l'idée de transposer cette loi à un réseau à trois dimensions. Avec des collègues de l'Université de l'Iowa, il a trouvé une structure dans laquelle certaines longueurs d'onde ne peuvent se propager dans aucune direction : la structure possède une bande photonique interdite. Si l'on crée localement un défaut dans cette structure et que l'on place un émetteur de lumière à une longueur d'onde adéquate de la bande interdite, cette lumière reste confinée au voisinage du défaut et est amplifiée. C'est le principe de base d'un nouveau type de laser.

Avec mes collègues, nous avons ainsi construit un réseau hexagonal de minuscules colonnes d'arséniure de gallium, espacées de telle façon qu'il piège la lumière infrarouge. Cette structure n'est pas encore un laser, mais nous pensons en obtenir un en excitant l'une des colonnes pour lui faire émettre de la lumière, qui serait ensuite réfléchiée de façon répétée (et efficacement confinée) par les autres colonnes du réseau.

Dans le même esprit, mais en remplaçant les colonnes par des trous dans un semi-conducteur, des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont fabriqué un minuscule pont de silicium de 470 nanomètres de largeur et de 200 nanomètres d'épaisseur percé, dans sa longueur, par une rangée de trous microscopiques. La lumière ne peut pas s'échapper par les côtés de ce pont, à cause de la différence des indices de réfraction du semi-conducteur et de l'air. Des simulations numériques avaient permis de calculer l'espacement périodique entre les trous pour obtenir un «réseau» qui confine la lumière infrarouge. En outre, on avait calculé qu'en écartant un

peu plus les deux trous situés de part et d'autre du centre du pont on créerait une «boîte» d'à peine un vingtième de micromètre cube de volume où un mode optique fondamental pourrait s'établir. Cette «boîte» devrait devenir un jour une cavité laser, les trous adjacents servant de miroirs. Cette structure a été construite sur un socle de verre, et l'on a vérifié que les résultats expérimentaux étaient comparables aux simulations.

D'autres travaux ont exploré des «réseaux photoniques» à trois dimensions qui, en théorie, confinaient la lumière dans toutes les directions, caractéristique idéale pour un laser sans courant de seuil. De telles structures sont toutefois difficiles à fabriquer, car les techniques disponibles ont surtout été mises au point pour la fabrication de composants électroniques couche par couche, en deux dimensions.

Les lasers sans courant de seuil réagiraient beaucoup plus rapidement que les lasers actuels : les électrons émis le sont tous dans le mode laser, et celui-ci s'établit très vite. En d'autres termes, faire bouillir un récipient d'eau ne prendrait que le temps de craquer l'allumette. Certains lasers peuvent déjà être mis en marche et éteints plus de 20 milliards de fois par seconde.

De telles vitesses s'imposent pour les communications par fibres optiques, et d'autres applications apparaîtront à mesure que ces dispositifs deviendront encore plus rapides, plus petits et plus efficaces. Les lasers sans courant de seuil, qui semblent aujourd'hui d'avantage à notre portée, grâce aux récentes percées dans la fabrication de structures d'échelle nanométrique, sont très prometteurs comme futurs composants pour transmettre et manipuler des informations.

Paul Gourley travaille aux Laboratoires Sandia.

J. JEWELL, J. HARBISON et A. SCHERER, *Les microlasers*, in *Pour La Science*, janvier 1992.

H. YOKOYAMA, *Physics and Device Applications of Optical Microcavities*, in *Science*, vol. 256, pp. 66-70, 3 avril 1992.

Optics of Nanostructures, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 46, n° 6, juin 1993.

Paul GOURLEY, Kevin LEAR et Richard SCHNEIDER, Jr., *Surface-Emitting Lasers*,

in *IEEE Spectrum*, vol. 31, n° 8, pp. 31-37, août 1994.

Paul L. GOURLEY, *Microstructured Semiconductor Lasers for High-Speed Information Processing*, in *Nature*, vol. 371, pp. 571-577, 13 octobre 1994.

John D. JOANNOPOULOS, Robert D. MEADE et Joshua N. WINN, *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.

Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications, sous la direction de John Rarity et Claude Weisbuch, Kluwer Academic Publishers, 1996.

La simulation du mouvement humain

JESSICA HODGINS

Utilisant les lois de la physique, des ordinateurs font courir, sauter ou plonger des personnages de dessins animés.

Nous percevons instinctivement les moindres détails des mouvements humains ; parfois même, nous reconnaissons un ami à sa seule démarche. Comment nous étonner que les films d'animation qui mettent en scène des personnages humains ne paraissent pas réalistes ? Nous remarquons facilement qu'une action n'est pas naturelle ou qu'elle est peu plausible, même si nous ne savons pas toujours identifier les défauts. En outre, nous percevons bien quand manquent les petits mouvements qui traduisent la personnalité ou l'humeur de l'individu.

La synthèse numérique du mouvement humain n'est pas limitée aux dessins animés ; elle est également utilisée dans la réalisation d'environnements virtuels, de jeux vidéo, mais aussi à des fins scientifiques, en ergonomie, en analyse des gestes sportifs et en rééducation motrice. Dans le film numérique *Toy Story*, produit en 1995 par les studios *Disney*, les personnages animés étaient des jouets que l'on supportait de voir bouger différemment d'un être humain, mais la réalisation de films analogues où les personnages seraient des enfants, par exemple, reste inaccessible. D'autre part, les entraîneurs formeraient mieux les athlètes s'ils disposaient de concurrents virtuels crédibles. Les créateurs de jeux vidéo recherchent des produits plus interactifs et plus attractifs... L'animation

progresses grâce aux perfectionnements de la simulation numérique complète des mouvements humains, fondée sur les lois physiques et sur les caractéristiques biomécaniques des individus.

Les réalisateurs d'animations numériques utilisent aujourd'hui trois techniques de base : l'interpolation entre positions clés, la captation du mouvement réel et la simulation. L'interpolation entre positions clés laisse plus de liberté à l'animateur, mais aussi plus de responsabilités dans la qualité du résultat, que la captation du mouvement réel ou la simulation.

L'interpolation entre positions clés n'est que l'automatisation partielle de la technique du même nom, autrefois entièrement manuelle : l'animateur spécifie certaines positions des objets, et l'ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation entre ces positions. Les personnages du film *Toy Story* étaient animés de cette façon : chaque personnage était décrit par plus de 700 points que l'on pouvait bouger indépendamment ; pour faire froncer un sourcil, par exemple, on indiquait la position des divers points du sourcil et on laissait l'ordinateur interpoler la position de chaque point dans les images intermédiaires.

Le dessin des positions clés par l'animateur peut être partiellement automatisé grâce à des techniques d'aide au placement des articulations du corps : si la main d'un personnage

doit être à un endroit donné, l'ordinateur calcule les angles correspondants du coude et de l'épaule. Le travail de l'animateur est ainsi simplifié, mais ce dernier doit tout de même savoir en détail comment se comporte un objet en mouvement et avoir le talent d'exprimer ces informations pour le des-



1. ON SIMULE LA COURSE en confiant à l'ordinateur les lois de la physique. Pour créer la séquence reproduite dans la partie inférieure de la figure, un ordinateur a déterminé les couples de force nécessaires pour faire osciller la jambe droite vers l'avant avant le contact au sol, évitant que le coureur ne trébuche. À l'aide de nombreux calculs de ce type, les ordinateurs simulent la mécanique de la course réelle (*en haut*). Les images des deux séquences, réelle et synthétisée, sont espacées de 0,066 seconde.

Jessica Hodgins

sin des positions clés. Cette technique est très utilisée, car elle permet le contrôle fin des mouvements.

La captation du mouvement réel est la deuxième grande technique d'animation : des capteurs magnétiques ou optiques enregistrent les mouvements de sujets humains ou animaux en trois dimensions ; puis un traitement des données par un ordinateur anime des personnages. Ainsi, de nombreux athlètes célèbres ont servi de modèles à l'animation de personnages de jeux vidéo sportifs.

La captation du mouvement est de plus en plus utilisée, notamment pour des animations de films publicitaires, parce que de nombreuses actions humaines peuvent être facilement enregistrées, mais cette technique est imparfaite. D'abord, on place, sur la peau ou sur les vêtements, des marqueurs, dont la position est perçue par les capteurs, mais qui glissent lorsque le sujet bouge, ce qui perturbe les mesures. Ensuite, on doit remettre à l'échelle du personnage graphique les informations

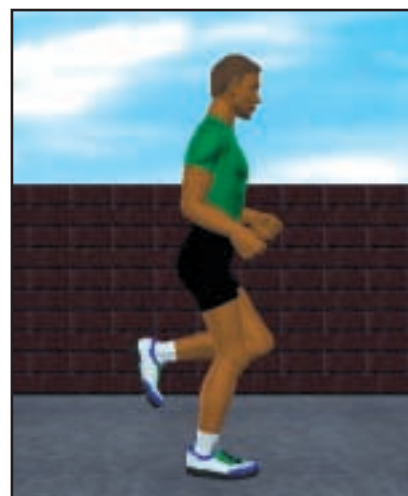
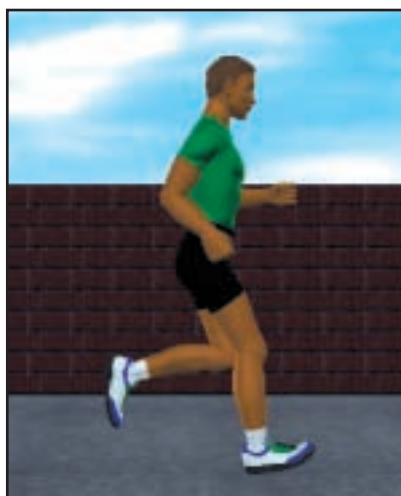
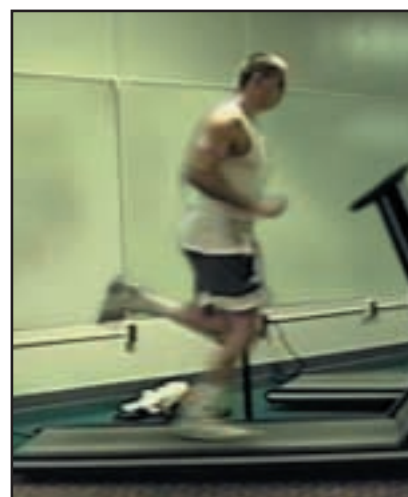
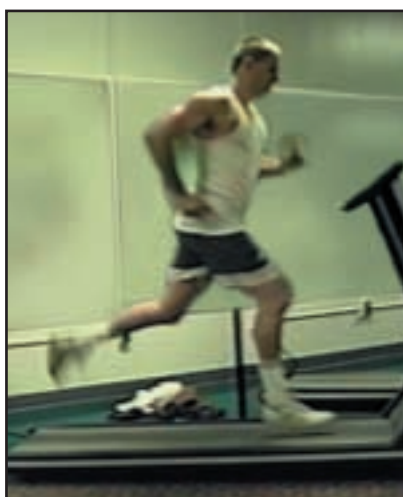
enregistrées sur un sujet réel qui n'a ni la même taille ni les mêmes proportions corporelles : sans ces ajustements, la main d'un personnage virtuel plus petit que l'original semblerait pénétrer dans une table plutôt que se poser dessus. Enfin, certains mouvements sont mal enregistrés avec les techniques actuelles. Avec les systèmes magnétiques, les câbles qui relient le sujet à un ordinateur restreignent sa liberté de mouvement, et la proximité d'objets métalliques ou d'un tapis roulant, qui peut être utilisé pour enregistrer le mouvement d'un sujet en train de courir, perturbe les mesures. Avec les systèmes optiques, on perd des informations lorsqu'une partie du corps en masque une autre.

Déduire le mouvement de la physique

Contrairement à l'interpolation entre positions clés et à la captation du mouvement, la simulation engendre le mouvement des personnages et des

objets en se fondant uniquement sur les lois de la physique. Les personnages sont généralement représentés par un ensemble de segments corporels rigides. Le corps, par exemple, peut être constitué d'un tronc, de segments supérieurs et inférieurs, et de pieds, reliés par des articulations. Avec mes collègues, nous avons recueilli de nombreuses données biomécaniques, y compris en prenant des mesures sur des cadavres, pour élaborer des modèles précis. L'avant-bras de notre homme adulte virtuel, par exemple, a une masse de 1,1 kilogramme, une longueur de 24 centimètres et une circonférence moyenne de 25 centimètres.

Malgré nos efforts, nos modèles ne ressemblent encore qu'approximativement au corps humain. Ainsi, les segments corporels sont rigides, et l'on ne tient pas compte du mouvement des muscles sur l'os. Par ailleurs, bien que l'épaule soit généralement modélisée comme une articulation unique à trois degrés de liberté, la



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.