

vers un point d'arrivée, elle est particulièrement efficace pour les simulations simples et pour des problèmes qui ont de nombreuses solutions, car la probabilité que l'ordinateur en trouvera une est grande. Les techniques

entièrement automatiques sont naturellement préférables à celles qui nécessitent une conception manuelle, mais les informaticiens n'ont pas encore trouvé de méthodes automatiques capables de simuler les comportements

de systèmes aussi complexes que l'être humain, sans fournir au préalable des connaissances précises sur les mouvements à effectuer.

Bien que la mise au point des systèmes de contrôle soit difficile, leur

Copie conforme

Comment synthétiser les mouvements et les expressions d'un visage, qui traduisent l'humeur, les sentiments et la personnalité ? La Société *Lamb & Company* a animé un «jumeau» numérique d'Alan Alda, acteur qui a tourné en particulier avec Woody Allen.

La Société *Lamb & Company* a construit un modèle numérique de la tête d'A. Alda à partir de mesures prises par balayage laser de l'acteur réel : les ingénieurs ont utilisé une «grille» de

12 000 polygones pour représenter la géométrie tridimensionnelle de la tête de l'acteur ; chaque polygone était associé à une carte de texture contenant des informations telles que la coloration et la régularité de la peau.

Les balayages laser ont été faits pour quatre poses : une vue de base, où A. Alda n'affichait aucune émotion, et des vues statiques de l'acteur souriant largement, grimaçant et souriant à demi. L'ordinateur a ensuite créé d'autres expressions par combinaison des quatre poses de base. Les animateurs ont aussi construit des vues statiques de l'acteur virtuel prononçant différents phonèmes (unités de base du langage tel le son «r» dans «rat»). Ce travail a surtout été réalisé à la main, bien que les outils d'assistance par ordinateur aient fourni une aide rudimentaire dans la modification des modèles informatiques. Au total, les animateurs ont créé une banque d'une soixantaine de vues, qu'ils peuvent à nouveau combiner pour produire de nouvelles variations.

Pour apporter mouvement et «vie» au modèle numérique, les animateurs ont travaillé avec des textes prononcés par l'acteur qu'un laboratoire japonais avait synthétisés, en séparant et en réassociant les phonèmes d'un véritable enregistrement de la voix d'A. Alda. La synchronisation des mouvements des lèvres de synthèse avec cette simulation audio a été très laborieuse.

Ce travail a nécessité l'analyse minutieuse de cassettes vidéo montrant l'acteur en action. L'équipe a observé comment il bouge la bouche lorsqu'il produit des sons 'oh' ou 'ooh', par exemple. Les animateurs ont aussi prononcé certains mots devant un miroir pour étudier les mouvements de leur propre visage.

La création de chaque image, dans la séquence synthétisée, aurait pris un temps considérable sans l'aide de l'interpolation entre positions clés, technique où un animateur ne spécifie que certaines positions d'un objet et où un ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation. Ainsi, la synthèse d'un personnage prononçant le mot «sel» sera fondée sur des photographies de la personne disant «sss», «eh» et «ell», l'ordinateur créant automatiquement les images intermédiaires. Cette technique a aussi été utilisée pour d'autres mouvements du visage, tels les clignements de paupières. Grâce à l'interpolation, 20 pour cent seulement des images ont été créées à la main.

Enfin, pour que le visage virtuel bouge naturellement, les ingénieurs ont effectué des semaines d'ajustements manuels : il y a

tant d'irrégularités dans les mouvements du visage et dans ceux associés à la prononciation du langage chez les êtres humains, qu'il faut près de dix fois plus de travail pour le réglage fin que pour produire le mouvement de base.

Le résultat est un film de deux minutes, composé d'environ 2 500 images. Il a coûté une fortune... mais le personnage créé n'est pas encore naturel au point qu'on le prenne pour un personnage réel.





3. LES MODÉLISATIONS D'UN HOMME, d'une femme et d'un enfant qui courent nécessitent des modifications : la simulation doit tenir compte des différences de masse des segments corporels des trois modèles, et de nombreux autres paramètres. Le saut de cheval est une action plus simple à simuler que la course, parce que le gymnaste est en l'air pendant la plus grande partie de la figure. Pendant cette période son corps obéit simplement à la loi physique de conservation de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

utilisation est relativement facile. Les animateurs utilisent maintenant ces systèmes pour reproduire des mouvements sans comprendre le déroulement de ces mouvements ni les équations sous-jacentes.

Toutefois, si la simulation permet la reproduction d'actions générales, elle n'aide pas à programmer des mouvements détaillés. Par exemple, l'animateur spécifiera le chemin suivi par une bicyclette, mais il ne pourra utiliser la simulation pour stipuler que le cycliste pédale de façon décontractée. Cette limite peut être en partie franchie par une combinaison de techniques : on engendre automatiquement les mouvements globaux par simulation, puis on affine les mouvements, telles les expressions faciales, par interpolation ou par enregistrement du mouvement. Les mouvements simulés sont également rendus plus réalistes par l'addition d'éléments secondaires, passifs, qui réagissent selon les mouvements du personnage principal : un trampoline se déforme lorsqu'un gymnaste rebondit dessus ; le sable qui se tasse sous les pieds d'un coureur, sur une plage, modifie l'allure de la course ; les vêtements, que l'on peut modéliser comme un ensemble de points reliés par des ressorts, bougent avec la personne qui les porte.

Par simulation, on reproduit aussi le comportement des foules. Un petit programme inséré en amont du système de contrôle évite les collisions en calculant la vitesse de chaque individu en fonction de la distance aux autres et des obstacles présents. Cette vitesse est alors utilisée par le système de contrôle de la locomotion de chaque individu.

Nous avons choisi d'étudier des activités sportives telles que la course ou la bicyclette, parce que la dynamique de ces actions contraint le mouvement et limite la recherche de lois de

contrôle. Les simplifications sont particulièrement nettes dans la simulation du saut de cheval : le gymnaste est en l'air la plupart du temps, et son moment cinétique est conservé. La course est une action plus compliquée, parce que l'athlète est le plus souvent en contact avec le sol, et que les couples de forces appliqués aux articulations, calculés par les lois de contrôle, modifient directement de nombreux détails du mouvement. Plus généralement, la simulation est beaucoup plus difficile quand les mouvements humains sont exécutables de différentes façons, selon les personnes : les mouvements où se manifeste le caractère, mimes ou gesticulations, par exemple, échappent à nos descriptions. Lorsque les lois physiques n'imposent pas les grandes lignes d'un mouvement, la simulation risque de ne pas sembler naturelle. On doit alors introduire des règles supplémentaires fondées sur l'observation et sur la mesure des mouvements réels.

Comment évaluer la qualité du mouvement humain simulé ? Tout dépend du but visé. Des environnements virtuels utilisables pour l'entraînement, le travail avec une machine ou le divertissement exigent des mouvements assez variés, expressifs et réalistes. On doit les évaluer avec un test analogue à celui qui avait été proposé par le mathématicien britannique Alan Turing : on se demande si l'on perçoit une différence entre le mouvement simulé et le mouvement réel, quand ils sont tous les deux présentés avec le même système graphique. Les premières expériences indiquent que l'on ne reproduit pas encore correctement le mouvement humain, mais certaines personnes trouvent les mouvements simulés plus réalistes que les mouvements réels lorsque le corps est schématisé par des points placés sur les articulations.



Dans le cas des simulations destinées à l'étude de questions scientifiques ou d'ingénierie, on évalue simplement les simulations en superposant le mouvement réel et l'enregistrement vidéo du mouvement de synthèse. On compare alors des données biomécaniques, tels les forces de réaction au sol, le temps de vol, la vitesse ou la longueur des pas. Les résultats de ces évaluations permettent, à leur tour, de corriger les modèles et les systèmes de contrôle et font progresser les simulations vers des scènes plus réalistes.

Jessica HODGINS est professeur à l'Institut de technologie de Georgie.

Andrew WITKIN et Michael KASS, *Spacetime Constraints*, in *Proceedings of SIGGRAPH 88*, ACM, 1988.

J. Thomas NGO et Joe MARKS, *Spacetime Constraints Revisited*, in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ACM, 1993.

Jessica K. HODGINS, Wayne L. WOOTEN, David C. BROGAN et James F. O'BRIEN, *Animating Human Athletics*, in *Proceedings of SIGGRAPH 95*, ACM, 1995.

G. MAESTRI, *Digital Character Animation*, New Riders Publishing, 1996.

Jessica K. HODGINS et Nancy S. POLLARD, *Adapting Simulated Behaviors for New Characters*, in *Proceedings of SIGGRAPH 97*, ACM, 1997.

Les poussières sahariennes

STEFANO GUERZONI • EMANUELA MOLINAROLI

Des poussières du Sahara traversent la Méditerranée et retombent sur l'Europe, notamment sous la forme de «pluies rouges».

D'Europe, le désert du Sahara est lointain, et plus lointaine encore l'idée que le sable et la poussière provenant d'Afrique du Nord puissent se faire sentir dans tout le bassin méditerranéen et dans la majeure partie de l'Europe. Certains de ces effets sont pourtant manifestes : des pluies laissent des traces rouges sur les voitures, et les vents de sirocco violents apportent parfois du sable. D'autres conséquences sont

plus discrètes, mais tout aussi importantes : certains carbonates basiques des poussières réduisent l'acidité des pluies, et les poussières apportent des éléments nutritifs (des ions contenant du fer et du phosphore) qui favorisent la croissance des algues dans les eaux marines, habituellement pauvres en ces substances.

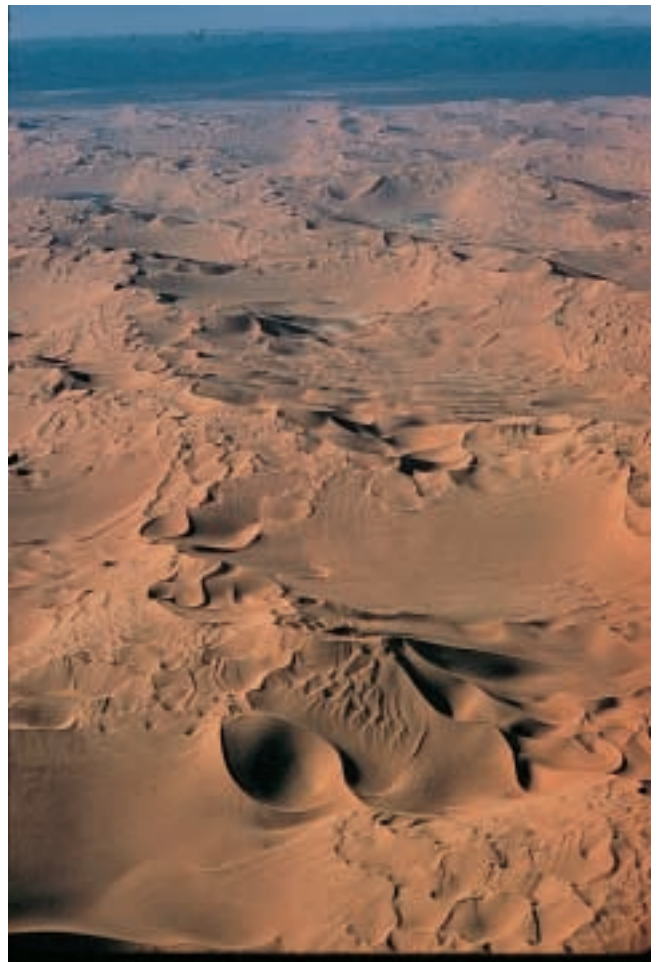
Ce transport des poussières est visible de l'espace : les astronautes à bord de la station *Skylab* ont observé

la trajectoire du sable du Sahara qui, soulevé par une tempête à l'Ouest du Sahara, traversait l'Atlantique et atteignait les Caraïbes. Chaque année, les vents transportent des centaines de milliers de tonnes de sable du Nord du Sahara vers l'Ouest et vers l'Europe. Sur les côtes méridionales de l'Europe, certains couchers de soleil ne sont pas rouges, mais d'un jaune d'or. Cette couleur est due à un voile de particules qui filtre la lumière



Pierre Boulet/Cosmos

1. LA COLORATION DORÉE de certains levers et couchers de soleil (à gauche), caractéristique du Sahara, résulte de la présence de poussières en suspension dans l'atmosphère. Ce spectacle



est parfois observable dans le Midi de la France. L'environnement saharien s'érode facilement, à l'image de la région de Tassili (à droite).