

ANIMACIÓN FACIAL: CÓMO (RE)CREAR EL PERFECTO ROSTRO HUMANO 3D

Sergi VILLAGRASA FALIP
Ingeniería y Arquitectura La Salle - Universitat Ramon Llull,
Barcelona, 08022, España

Jaume DURAN CASTELLS
Didáctica de la Educación Visual y Plástica - Comunicación Audiovisual, Universitat de Barcelona,
Barcelona, 08035, España

Judith CLARES GAVILÁN
Estudios de Ciencias de la Información y la Comunicación, Universitat Oberta de Catalunya,
Barcelona, 08018, España

RESUMEN

El modelado 3D y la animación facial humana es una de las tareas más complejas en el área de gráficos por ordenador. Hoy en día, la creciente demanda de animación facial se acelera, partiendo principalmente de la industria del cine y la televisión, pasando por los agentes sociales en mundos virtuales o hasta llegar a la medicina o la criminología.

¿Por qué el objetivo de animar y representar una cara humana 3D es tan difícil de conseguir?

Parte de la respuesta está en la percepción humana sobre el rostro humano. Somos capaces de detectar hasta el más mínimo detalle de una cara, debido a que la principal vía de comunicación visual es el rostro, y cualquier factor fuera de lo normal es detectado con facilidad.

Por otra parte, la reproducción de una expresión humana es altamente compleja de reproducir en gráficos por ordenador, ya que el gran detalle a que se debe llegar en tanto la textura, el modelo geométrico, la piel y la animación de cada uno de los músculos lo hacen de una complejidad aún difícil de superar.

En este paper analizaremos y compararemos las diversas tecnologías de modelado y animación facial existentes. Una vez expuestas las diferentes tecnologías, concluiremos seleccionando que técnica o qué combinación de ellas son las que nos aportan más flexibilidad, menos costes humanos y económicos, y más alta calidad final de producción de animación facial para broadcast.

Palabras clave: Animación por ordenador, Animación Facial, Motion Capture, HRDI.

1. INTRODUCCIÓN

Una nueva generación de personajes CG llamados *synthespians* o *virtual actors* está cada vez más cercana. Muchos dicen que los actores de carne y hueso competirán en un futuro cercano con sus colegas virtuales.

¿Pero cuándo? ¿Que nos falta para llegar a ver actores virtuales creíbles y realistas junto a actores de carne y hueso? ¿Por qué el objetivo de animar y representar un avatar y sobretodo una cara humana en 3D es tan difícil de conseguir? ¿Qué debemos tener en cuenta y en qué campos necesitamos investigar más?

En la industria cinematográfica tenemos varios ejemplos de innovaciones en el campo de avatares y animación facial.

En *Matrix* (1999), de los hermanos Wachowski, aparecieron avatares de Neo y el agente Smith para recrear las múltiples copias del agente y de Neo para los combates, y así tener libertad total de movimiento de cámara y conseguir efectos visuales nunca vistos. Aunque esos avatares, eran en roles secundarios, y en planos generales. Para ello, Borshukov et al. [1] crearon un nuevo sistema de captura de movimiento denominado *Universal Capture* para la captura de movimiento y captura facial.



Figura 1. Agente Smith en *Matrix Reloaded*.

Para que la animación de avatares y en concreto la animación facial tenga éxito debemos ser capaces de producir muy rápido, de la máxima calidad y a bajo coste: debemos trabajar en motores de animación y automatizaciones casi perfectas, donde en última instancia, al animador únicamente manipulara detalles de caracterización, y así evolucionar el concepto animador a un director de “actores virtuales”.

El gran reto

Las ventajas de los actores virtuales son muy atractivas. Un niño *synthespian* no tendrá problemas en ser dirigido y en la misma actuación. ni tendrá cambios de comportamiento durante el rodaje. Un avatar puede trabajar sin parar, sin cansarse, sin quejas, sin costes adicionales... Un avatar nunca crece ni envejece.

Hasta hoy, la mayoría de *synthespians* trabajan en la mayoría en escenas de riesgo y en planos lejanos: pasajeros del *Titanic* (1997), de James Cameron, planos peligrosos de acción en entornos peligrosos como en Moria en *The Lord of the Rings: The Fellowship of the ring* (2001), de Peter Jackson, o cuando el personaje del abogado Donald Gennaro es devorado por un Tiranosaurio en *Jurassic Park* (1993), de Steven Spielberg.

Cuando el lenguaje requiere realismo, las personas son muy perspicaces en la detección de lo que es real y de lo sintético. Al problema de la detección de "algo extraño" en avatares que quieren pasar por reales sin conseguirlo se suele explicar por el *uncanny valley* [2]. Si el lenguaje audiovisual no requiere de esa autenticidad, automáticamente, los personajes cobran vida, y no caen en el *uncanny valley* y la sensación de la realidad cambia, tal y como ocurre en *Toy Story* (1995), de John Lasseter. Los juguetes tienen una animación muy realista pero queda por sentado que son juguetes y por tanto la no precisión en animación o aspecto mejora incluso la aceptación de los personajes. En cambio cuando el personaje digital se quiere hacer pasar como humano y el aspecto es muy realista aparece el problema del valle en el *uncanny valley*. Esto pasa por ejemplo en *Polar Express* (2004) o *Beowulf* (2007), ambas de Robert Zemeckis.

Precisamente en recrear el aspecto humano (piel, cabello, músculos) está prácticamente alcanzado a nivel técnico y es al menos creíble. En este aspecto es clave la evolución de la ley de Moore sobre la potencia de computación: hoy en día, y en un futuro cercano, la potencia gráfica y de computación permite acceder a los niveles de cálculo necesarios para la simulación compleja del modelo, la textura y el tratamiento de la luz hasta alcanzar el debido fotorealismo.

Lo realmente complejo aún hoy en día y unos de las grandes quimeras en la industria es crear movimientos convincentes de animación facial.

Habitualmente, los animadores deben crear los movimientos fotograma a fotograma, el cual es un ingente trabajo. Hoy en día, se ha acelerado con la *performance driven* o denominado también *motion capture (mocap)*. Pero aún así, se debe retocar los *keyframes* laboriosamente.

En *Matrix Reloaded* (2003) y *Matrix Revolutions* (2003), de los hermanos Wachowski, el uso de *optical flow* y fotogrametría en el sistema de *Universal Capture* fue determinante para capturar con varias cámaras de alta definición cada punto de la cara de los actores. En *Polar Express*, se usó sistemas Vicon y capturados unos 150 puntos faciales. Aunque estos sistemas son todos automáticos se requiere de mucho esfuerzo de retoque manual. Otro punto importante en los sistemas de captura fue en alcanzado en el señor de los anillos con el trabajo de Gollum. Mark Sagar [3] investigó y mejoró el sistema de *mocap* añadiendo FACS para la interpretación de los diferentes movimientos capturados. El sistema perfecciona la animación de la cara del simio en *King Kong* (2005), de Peter Jackson.

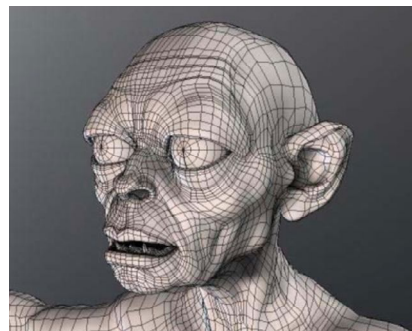


Figura 2. Modelado en subD de Gollum.

Aún con estos sistemas de *mocap* cada vez más avanzados, se debe trabajar en motores automáticos faciales 3D. Podríamos simplificar diciendo que debemos elaborar automatismos como si de un robot se tratara, con cada músculo, parpadeo, o acción muscular facial preprogramada. En ese sentido, FACS, que divide en Unidades de Acción muscular cada movimiento facial podría ser una excelente base para futuras implementaciones.

Como dice Scott Ross, Presidente de Digital Domain, el problema es intangible: Una de las cosas más complejas de recrear en un actor virtual es que llevamos millones de experiencia acumulada en nuestro código genético. Si realizamos un primerísimo plano de los ojos de un actor virtual, ahí es donde el actor virtual debe ser capaz de mostrar que tiene alma. Y es evidente que no la tiene.

2. BREVE HISTORIA DE LA ANIMACIÓN FACIAL

Una breve cronología de la evolución de la técnica en animación facial podría resumirse en:

- 1971. Se da a conocer la primera representación 3D facial, por Frederic Parke [4].



Figura 3. Modelo facial de F. Parke.

- 1974. Se presenta la primera cara 3D en Utah por Parke, con expresiones y conformada.
- 1977. Surge FACS de Ekman & Friesen [5].
- 1981. Primer modelo basado en músculos por Badler & Platt [6]. Hay que destacar en la historia que en 1980 y 1981 salieron las primeras estaciones Silicon Graphics, las cuales aportaron un incremento de cálculo notable y se empezó a vislumbrar las posibilidades futuras de la animación 3D.
- 1985. Surgió el primer cortometraje donde el protagonista tiene una actuación facial 3D: *Tony de peltrie* (1985), de Pierre Lachapelle y Philippe

Bergeron. En este año surgió también el primer personaje animado en un film de ficción: *Young Sherlock Holmes* (1985), de Barry Levinson, el cual un caballero de cristal cobraba vida en la iglesia.



Figura 4. Tony de Peltrie.

- 1985. Nadia Magnenat-Thalmann y Daniel Thalmann realizan importantes avances en avatares virtuales
- 1988. Pixar crea *Tin Toy*, de John Lasseter en 3D. Donde se puede ver un bebe y primeras animaciones faciales de éxito.
- 1989. Digital Domain crea *The Abyss*, de James Cameron, en donde podemos ver animación facial humana en una serpiente de agua.
- 1991. Se estrena *Terminator 2: Judgment Day*, de James Cameron, donde podemos ver a un completo avatar virtual
- 1995. *Toy Story* se convierte en el primer largometraje 3D. Numerosa animación facial creada por artistas mediante *keyframing* y *blendshapes*. Interesante aportación la animación facial en *Babe*, de Chris Noonan, donde se animó en 3D la cara del cerdito.
- 1996. Se puede ver animación facial no humana en *DragonHeart*, de Rob Cohen.
- 1997. Se experimenta con la subdivision de superficies en *Geri's Game*, de Jan Pinkawa.
- 1998. Más animación facial no humana con gran expresividad en *A Bug's Life*, de John Lasseter.
- 1999. Aparece el standard MPEG-4 que define acciones faciales para la recreación de animación facial en tiempo real. Se puede decir que el inicio del 2000 ya es un éxito y notable el uso de la animación 3D y animación facial 3D.
- 2001. *Final Fantasy: The Spirits Within*, de Hironobu Sakaguchi, revoluciona la industria con la calidad de render y el aspecto realista de los personajes, aunque para muchos cae irremediabilmente en el *uncanny valley*.
- 2002-2008. En el *The Lord of the Rings*, se crean actores virtuales de los principales personajes para las escenas

de riego. En *The Two Towers* (2002), de Peter Jackson, aparece el personaje animado Gollum. Numerosa actividad de animación facial de calidad en *Star Wars: The Phantom Menace* (1999), de George Lucas, *Hulk* (2003), de Ang Lee, y en *King Kong* (2005), de Peter Jackson, como films a destacar por su alto nivel de animación facial.

3. UNCANNY VALLEY

En la creación de animación de personajes generados por ordenador, y concretamente de animación facial podemos contar con la teoría aplicada en la robótica como el *uncanny valley*, introducido por Mori en 1970 [2].

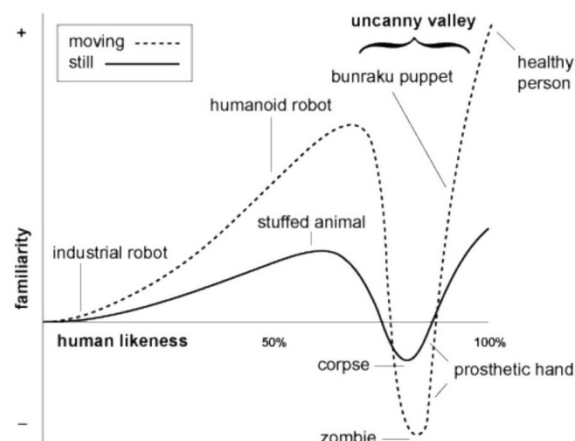


Figura 5. The uncanny valley.

La animación facial requiere mucho más trabajo que el cuerpo para obtener una respuesta satisfactoria de percepción humana de algo "vivo".

La teoría es un principio de la robótica sobre las respuestas emocionales de los humanos hacia los robots y otras entidades no humanas. Fue descrito por el robotista japonés Masahiro Mori en 1970. Este principio dice que la respuesta emocional de un humano hacia un robot hecho en apariencia y comportamiento muy similar al humano, incrementará positivamente y de forma empática, hasta alcanzar un punto en el que la respuesta emocional se vuelve de repente fuertemente repulsiva. Cuando la apariencia y comportamiento (del robot) se vuelven indistinguibles al ser humano, la respuesta emocional vuelve a crecer de forma positiva y se va aproximando a niveles de empatía como los de entre humanos.

Si visualizamos la grafica de Mori (Fig. 5), podemos observar que con poco parecido humano la empatía es baja pero va subiendo acorde el parecido humano. Son ejemplos robots industriales que son meramente brazos mecánicos. A la que vamos subiendo en parecido humano, encontramos que la empatía es cada vez más alta, como por ejemplo en el largometraje de PIXAR *WALL·E* (2008), de Andrew Stanton. Tiene modos humanos, con ojos, brazos, etc. Pero aún muy lejos de la apariencia humana. También podemos encontrar en esta zona a numerosos films de animación como *The Lion King* (1994), de Roger Allers y Rob Minkoff, y casi todos los films protagonizados por animales. La empatía es mayor cuantos más rasgos humanos se le confiere.

Más arriba en el realismo encontramos en *The Incredibles* (2004), de Brad Bird, por ejemplo, y a muchos personajes Disney. A partir de este punto si el parecido humano aumenta, nos encontramos con un sentimiento contrario a lo esperado, de repulsa o disgusto. Aquí podemos comparar por ejemplo al sentimiento que tenemos hacia muertos vivientes en la punta más honda del valle, pero podríamos incluir en el valle las aproximaciones más realistas que se han generado por ordenador, como *Final Fantasy*, *Polar Express* o *Beowulf*. En cambio, Gollum, o Kong, al alejarse al parecido humano no se encuentra en el valle.

4. TECNOLOGÍA

Existen muchas aproximaciones y problemas relacionados al modelado, la textura, la luz, el render y sobretodo en la animación facial.

La animación facial está basada en las ideas de Parke [4]. Trabajos posteriores remarcables son los de Platt & Badler [6], quien construyó un modelo facial capaz de simular y animar objetos no rígidos basados en muelles. También en 1978 es destacable remarcar el estudio realizado por Eckman y Friesen en 1978 del FACS (*Facial Action Coding System*), [5].

Desde Parke hasta nuestros días se han escrito numerosos estudios enfocados a la cara. Se han escrito técnicas para la animación 3D tales como la interpolación por *keyframe* y los basados en *blendshapes*, técnica que actualmente aún se utiliza en los software de animación, y en numerosas producciones en nuestros días. También se combinan técnicas como la parametrización de la cara, inserción de músculos y pseudo-músculos.

Para la manipulación de la imagen y concretamente para el 3D, citamos la técnica del *morphing* para los *blendshapes* principalmente y la deformación de malla mediante *skinning*.

En la investigación actual es notable el *performance driven*, es decir captura facial mediante marcadores o sin ellos (Image Metrics), pero con la obligación de que sea una persona real la que dirija la animación. Este método actualmente está dando unos resultados muy realistas y en cortos periodos de producción.

Los beneficios de la *performance driven* son evidentes, pero la complejidad de la captura y la necesidad de tener actores para la captura es una restricción fuerte para numerosas producciones.

A continuación vamos a mencionar métodos y tecnologías para conseguir recrear al perfecto rostro humano, centrándonos principalmente en la animación facial.

4.1 EL MODELADO

El primer paso para conseguir un perfecto trabajo facial, es tener buenas referencias para modelar. Es cierto, que en muchos casos, donde los costes de producción no son un problema, puede crearse el modelado mediante scanners de figuras moldeadas en arcilla por un artista. También podemos capturar el modelo mediante técnicas de fotogrametría tal y como trabaja *Universal Capture*. Así pues para una buena referencia aconsejamos captar numerosas fotos a partir de la vista frontal de la cara y realizar fotografía del modelo facial cada 45 grados.

La fase de modelado mediante algún software especializados como Maya, 3ds Max o Softimage requiere un balance entre alto grado de técnica de la herramienta y aptitudes artísticas de escultura. Hoy en día, mejorando el tiempo de producción y la

calidad final del modelo se aconseja trabajar en un modelo de baja poligonalización, y trabajar los detalles tales como surcos, arrugas, bultos, etc., con programas como Zbrush de Pixologic o Mudbox de Autodesk. Y es necesario tener en cuenta las proporciones antropométricas de la cara a modelar. Como dicen que los ojos es donde reside la mayor parte de la fuerza interpretativa de la cara, se aconseja primero trabajar esa parte.

En cuanto a los tipos de geometría a modelar:

- Vectores.
- Polígonos.
- Bi-Cúbicas (*Nurbs*).
- Subdivisión de superficies (*SubD*).

En cuanto a los tipos de geometría a modelar, para mundos virtuales y motores faciales en tiempo real, debe trabajarse íntegramente con mallas poligonales.

Para modelos fotorealistas destinados a films, en numeroso films se trabaja con *Nurbs*, aunque esta técnica ha ido cediendo paso completamente a la subdivisión de superficies por tener mucha más flexibilidad en el modelado que *Nurbs*.

Así por ejemplo, en *The Fellowship of the Ring* el Gollum y algunos dobles digitales se trabajaron íntegramente en *Nurbs*, pero en *The Two Towers* se pasó a *SubD* (Fig. 2).

4.2 LA TEXTURA, LA LUZ y EL RENDER

En primer lugar, las texturas de desplazamiento generadas, se aconseja trabajar en 32bits para una mayor calidad de textura y tamaños de al menos 2K.

Es aconsejable para la piel trabajar con *shaders SSS* (*Sub Surface Scattering*) para una imagen más real del comportamiento cutáneo. Es necesario también pintar mapas de especular y combinarlos con mapas de *fresnel* para un comportamiento natural de la luz sobre la piel. Se aconseja también trabajar en *bump* o *normal mapping* para los detalles de arrugas en la piel.

Es importante para un render fotorealista, poder trabajar en ese sentido una iluminación que pueda integrar el modelo 3D con imagen real así tener una imagen más natural. Así q pues en esa dirección se aconseja trabajar en iluminación HRDI y combinada con iluminación directa específica para ciertas zonas como por ejemplo el cabello.

Se aconseja para una iluminación realista Mental Ray o Vray con Final Gathering y HRDI [7].

4.3 ANIMACIÓN FACIAL

Generalizando en un primer paso, podemos describir cinco fases en el proceso de la animación facial:

- Expresión: Las expresiones faciales y/o los fonemas son creados, teniendo en cuenta su intensidad y duración.
- Control: Las expresiones son convertidos a un conjunto de parámetros de animación. Los fonemas son mapeados a los movimientos labiales, los visemas, los cuales pueden ser expresados con parámetros de animación.

- Simulación: Los parámetros de animación son interpretados con complejos sistemas de cálculo basado en modelos matemáticos de la cabeza, que incluyen datos como la anatomía humana o las dinámicas faciales como por ejemplo la elasticidad de la piel o de los músculos.
- Geometría: La geometría se actualiza en función de la simulación.
- Imagen: La geometría es renderizada en imágenes.

Las técnicas existentes en las distintas fases de la animación facial podemos resumirlas en *keyframing*, parametrización, deformación de geometría, físicamente basado, músculos, y *performance driven*.

Keyframing

Este tipo de método es sin duda de los más sencillos, más antiguos y más usado de entre los utilizados actualmente. Éste consiste en coger un vértice en un espacio 3D y transformar su posición en otra localización específica. A partir de esta asignación de cambio de localización, el ordenador computa los puntos intermedios que “existen” entre el punto origen y final, moviendo el vértice a lo largo de dichos puntos calculados por el ordenador. Este desplazamiento se especifica como una función temporal. Si no tenemos suficientes *keyframes*, la animación resultante no es fluida, sobre todo para modelos complejos. La línea de acción suele ser incorrecta y los objetos pueden interseccionar unos con los otros [8]. Este método tiene algunos puntos negativos: genera mucha información como para ser controlada de manera eficaz por un usuario. Se requiere de un alto control y capacidad técnica. Hoy en día, la animación *keyframe* se utiliza en combinación a otras técnicas, tales como el *mocap* o el *data-driven*.

Parametrización

Como el *keyframing* tiene tan alto volumen de información, es común basarse también en controles paramétricos para controlar grupos de vértices. Se siguió trabajando en la reducción de parámetros y se derivó un método el cual llamaron *direct parameterisation* [9]. Un buen ejemplo de la parametrización es el estándar para animación en tiempo real MPEG-4, el cual define un conjunto de parámetro denominados Facial Parameters Points. Este estándar se complementa con lenguajes multimedia como SMIL o VRML para la ejecución de la animación.

Deformación de geometría

Consiste en utilizar un objeto para modificar a otro objeto más complejo, pero con un control más simple y más intuitivo que el *keyframing* y la parametrización. Cuando se utiliza la técnica de huesos con el modificador de geometría, se requiere realizar un *rig* del modelo para poder controlar y animar los huesos. Este *rig* no es más que controles ligados a los huesos que facilitan el manejo, y controlan el comportamiento del hueso. Es por el motivo de la alta complejidad de controles y la alta cantidad de información a manejar que necesitamos de un buen sistema de control por encima que controle los huesos de manera automática.

Físicamente basado

Consiste en simular las propiedades visco-elásticas de la piel facial y los músculos para generar expresiones y animaciones. Las tecnologías dominantes en los modelos físicos son las masas-muelles y los algoritmos de elementos finitos, los cuales pueden

ser utilizados separadamente o combinados, dependiendo de la intensidad de la simulación.

Músculos

Los más tempranos esfuerzos hacia un modelo basado en músculos (*muscle-based model*) fueron los de Platt & Badler (6). Ellos construyen un modelo masas-muelles (*mass-spring*) de una fibra muscular como un de las capas de abstracción de su sistema. La investigación sobre la animación muscular se caracteriza por la simulación de los músculos y sus acciones coherentes con los músculos reales del cuerpo humano. Una propuesta importante fue la contribución de Waters [10].

Definió tres tipos de músculos diferentes: lineales, planos y esfínteres. Los músculos son insertados en la superficie y están estructurados independientemente de los huesos del cráneo.

Recientemente se desarrolló [11] unos de los más avanzados modelos, el cual utiliza elementos finitos no lineales para determinar la acción del músculo, capturado por marcadores faciales. Lo interesante de esta aproximación es que el modelo puede ser modificado por fuerzas exteriores, como por ejemplo el impacto de un objeto sólido. Más allá, podemos tratar de incrementar realismo en incluir un esqueleto interior y deformación mejorada en los labios.

Performance driven

Consisten en capturar movimientos y acciones de personas reales (los *performers*) para usarlos para animar personajes sintetizados. Estos métodos necesitan por tanto grandes cantidades de información. Asimismo, capturar dicha información significa utilizar una multitud de marcadores faciales.

Ahora bien, con el *mocap*, la fase de animación se simplifica enormemente. Con la técnica del *keyframing*, una animación puede demorarse semanas. En cambio, con el *mocap*, el trabajo de animación de personajes se realiza en pocas horas, aunque luego se trabaje en los retoques de la captura. Además, el *mocap* aporta también la sutil interpretación de los actores, la expresividad de los cuerpos y el peso de las acciones.

Un largometraje como *Total Recall* (1990), de Paul Verhoeven, ya utiliza la técnica del Motion Capture en alguna escena. En *Final Fantasy: The Spirits Within*, ya es habitual. Y en *The Polar Express*, se utiliza por primera vez el *mocap* facial. En este último film, se captaron las expresiones del actor norteamericano Tom Hanks para luego hacer interpretar al personaje 3D con un parecido físico y gestual muy notable. En *Monster House* (2006), de Gil Kenan, su tratamiento ya es muy funcional.

Existen numerosas propuestas innovadores que veremos en próximas producciones y que mejoran radicalmente la captación de la esencia de la actuación de un actor, como por ejemplo Image Metrics o Mova.

5. CONCLUSIONES

Para finalizar, podemos concluir que para la recreación del perfecto rostro humano deberíamos tener algunos puntos en cuenta.

Primeramente, superar el *uncanny valley*. Por mucho que nos acerquemos al realismo, si este no es perfecto, caeremos en el valle, y el resultado será detección de falsedad y de no estar vivo.

En cuanto a las diferentes fases, el modelado debe ser de muy alta resolución.

Para la textura, debe crearse múltiples capas para la simulación de la piel para el comportamiento de reflexión interna (SSS) y generar capas de brillos, difusa, relieves e incluso *displacement* para los bultos y arrugas.

Para la iluminación, para un realismo, concluimos utilizar los sistemas HRDI para una perfecta integración de la luz con el entorno.

Finalmente, para el movimiento, pensando en costes de producción y calidad final, debemos pensar que la animación esté dirigida mediante una persona, es decir con la técnica de *performance driven*, aunque de los diversos métodos comentados, podemos sugerir los sistemas no intrusivos combinado por ejemplo con sistemas de *rigging* complejos basados en FACS.

El objetivo, pues, parece ya cercano. Pronto podremos ver largometrajes con actores virtuales humanos junto a las grandes estrellas del cine.

Robinson-Mosher, Ronald Fedkiw. Vienna : Symposium on Computer Animation archive, 2006.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Universal Capture – Image-based Facial Animation for “The Matrix Reloaded”. Borshukov, George. 2005. Siggraph.
- [2] The Uncanny Valley. Mori, M. 4, 1970, Vol. 7.
- [3] Facial performance capture and expressive translation for King Kong. Sagar, Mark. Boston, Massachusetts : ACM SIGGRAPH, 2006.
- [4] Computer generated animation of faces. F.I.Parke. 1972. Proceedings of the ACM annual conference. págs. 451-457.
- [5] Facial Action Coding System. Ekman, Paul, Friesen, Wallace V. y Hager, Joseph C. 2002.
- [6] Animating facial expressions. Platt, Stephen M. y Badler, Norman I. Dallas, Texas : International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1981.
- [7] Acquiring the Reflectance Field of a Human Face. P.Debevec, y otros. s.l. : ACM Press, 2000, Siggraph, págs. 145-146.
- [8] Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. Lasseter, John. s.l. : International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1987.
- [9] Parameterized Models for Facial Animation. F.I.Parke. 9, November de 1982, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 2, págs. 61-68.
- [10] Physically based Facial Modelling, Analysis, and Animation. K.Waters y D.Terzopoulos. 2, Diciembre de 1990, Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 1, págs. 73-80.
- [11] Simulating speech with a physics-based facial muscle model. Eftychios Sifakis, Andrew Selle, Avram