

Grafito Virtual

Germán Arroyo

Francisco J. R. Prados

Grupo de Investigación en Inormática Gráfica
Dpto. de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad de Granada

Abstract

Los trabajos recientes en la visualización expresiva han producido resultados comparables a las imágenes artísticas. Recientemente el campo de la realidad virtual ha desarrollado herramientas que permiten al artista trabajar con medios digitales en mundos virtuales, una de estas herramientas son los dispositivos hápticos. En este artículo se presenta un nuevo método para generar imágenes de lápiz utilizando dispositivos hápticos y simulando lápices de grafito realistas. El trabajo presentado permite simular las características de la mina sobre distintos tipos de papel teniendo en cuenta la presión, la orientación y la posición del lápiz virtual ofreciendo resultados muy convincentes en tiempo real.

Categories and Subject Descriptors (according to ACM CCS): I.3.4 [Computer Graphics]: Graphics Utilities—Paint Systems

1. Introducción

El dibujo a lápiz es una técnica de dibujo artístico en la que la imagen se genera mediante la distribución de trazos de distinta forma y tamaño para que transmita la información de forma y tono del objeto representado. La ventaja de este tipo de técnicas frente a otras es que se pueden generar imágenes simplificadas con gran realismo y grado de detalle incluso para bocetos [See03]. La componente expresiva implica que la información mostrada es más fácilmente tratable por el observador, incluso haciendo visibles características que no se mostrarían en una imagen realista [IS94]. El ilustrador es capaz de dirigir la atención hacia aquellas partes que considera más importantes dando un nivel mayor de detalle mediante un mayor número de trazos [Woo94]. También puede dar cierto dinamismo a la escena deformando los mismos, haciéndolos irregulares y cambiando la presión en los trazos [SB99] [TFN99] (figura 1).

Hasta ahora, los métodos para generar lápiz se han basado en la distribución de texturas a lo largo de un papel siguiendo un trazo determinado [Her01] [SB99]. Sin embargo ninguna de estas técnicas tiene en cuenta aspectos tan importantes como el desgaste de la mina o la presión que ejerce el artista sobre el papel [TFN99]. Con las nuevas herramientas háp-

ticas de las que se disponen podemos detectar la presión de objetos sobre “papel” virtual y simular estos aspectos.

El artículo se compone de las siguientes partes:

- Trabajos previos: donde se analizará el estado de arte
- Descripción del problema: donde se describirán los aspectos relevantes a tener en cuenta para la simulación de lápiz sobre distintos papeles, tanto físicamente como por parte del artista.
- Análisis y modelado del problema: se plantea una solución al problema de encontrar una herramienta virtual que simule los aspectos anteriores

2. Trabajos previos

Existen numerosos trabajos previos en el campo de la visualización expresiva orientada al dibujo de lápiz. La mayoría de ellos se centra únicamente en la generación de trazos ya que se utilizan texturas para la simulación del trazo [CLR*04]. Otros se centran en la generación de lápiz mediante la modificación de programas en las tarjetas gráficas (shaders) para conseguir un aumento de la velocidad a coste de disminuir la calidad del dibujo [LKL06]. También existen trabajos en la simulación de trazos humanos mediante el uso de splines [MTXS06].



Figura 1: Ilustración a lápiz de un artista.

Sin embargo, todos los trabajos mencionados proponen sustituir al artista por una herramienta automática, lo cual, hasta el día de hoy, es imposible. Es por ello que en las secciones siguientes se propondrán los métodos para la simulación de las herramientas digitales que permitan a un artista generar imágenes digitales de lápiz.

3. Descripción del problema

En esta sección se hará una breve descripción de los elementos presentes cuando se realiza un dibujo a lápiz sobre papel, tanto los físicos (el papel y el lápiz) como los elementos energéticos (rozamiento, movimiento sobre el papel).

3.1. El papel

Existen trabajos previos en el ámbito de la simulación del dibujado de trazos mediante la minimización de distintas ecuaciones de energía que funcionan bastante bien sobre trazos automáticos de lápiz [Her01] pero ninguna de estas ecuaciones tiene en cuenta la presión del lápiz sobre el papel o las características del mismo. Es importante destacar la importancia del papel en dibujos de lápiz [DH80]. El papel es en realidad un conjunto de fibras que se interconectan entre sí. Cada una de ellas se puede ver como un conjunto de

valles y montañas que impiden o facilitan el movimiento del lápiz sobre la superficie.

3.2. El lápiz y el artista

En lápiz se suelen utilizar minas de distinta dureza y grosor. Por ejemplo, son característicos los lápices duros H3 o los lápices blandos B2, o incluso los carboncillos que funcionan como lápices gruesos de mina muy blanda. Una característica común de todos ellos es que al pasar sobre el papel, las minas van gastándose, haciendo que el artista tenga que mover el lápiz o carboncillo para evitar trazos muy finos o demasiado gruesos [Woo94].

También es importante la forma de la mina, ya que con el roce, ésta va gastándose, pudiendo dar trazos distintos según la cantidad de uso antes de volver a afilar el mismo.

3.3. Tacto y rozamiento del lápiz

El artista normalmente apoya el papel sobre una superficie muy pequeña. Esta superficie puede considerarse despreciable debido al grosor del papel. Cuando el lápiz interactúa con ella, el choque de la punta de grafito con la superficie de dibujo produce una colisión sobre la superficie sobre la que está el papel, la cual, puede ser considerada como inelástica.

Cuando el artista mueve el lápiz sobre el papel se da una componente de rozamiento o fricción, generado por las imperfecciones microscópicas de las dos superficies de contacto. Este rozamiento puede ser a su vez de dos tipos: estático, que impide al lápiz moverse libremente cuando está apoyado sobre un punto fijo del papel; y dinámico, que se opone a la dirección del movimiento. [SFYZ04]

3.4. Composición del grafito

Físicamente la mina de un lápiz está formada por una mezcla de grafito natural pulverizado y arcilla horneados a unas temperaturas específicas.

El grafito es una de las dos formas cristalinas en las que se presenta el carbono en la naturaleza, siendo el diamante la otra estructura formada únicamente de carbono cristalino. El grafito está formado por capas muy separadas en las que cada átomo de carbono se halla rodeado por otros tres, todos en el mismo plano, formando grupos hexagonales de seis átomos. Tres de los cuatro electrones de cada átomo de carbono están compartidos. El cuarto sirve para mantener los planos unidos, lo cual deriva en un plano de electrones móviles entre los planos hexagonales. En virtud de esta estructura, el grafito se exfolia fácilmente, y es un buen conductor del calor y de la electricidad. [BA70]

Según la dureza de la mina se emplea una proporción mayor o menor de grafito-arcilla, a mayor arcilla mayor dureza. Normalmente, los lápices duros se mantienen más tiempo

afilados debido a que desprenden menos partículas de grafito al rozar contra el papel [Sim00].

Los lápices pueden ser clasificados según su mina en:

- Lápices duros: De mina seca, tenaz, a grisacea y algo más estrecha.
- Lápices blandos: De mina aceitosa, fragil, oscura y más gruesa.

Los lápices duros se suelen denotar con una H, mientras que los blandos se suelen denotar con una B. Todos tienen asociado un número según su dureza.

4. Análisis y modelado del problema

Una vez se han determinado los elementos que intervienen en la interacción del lápiz con el papel se plantea la cuestión de encontrar un equivalente virtual que simule cada uno de los mencionados aspectos. En lo que sigue se describirá el modelo que proponemos para la representación del grafito, del papel y de la interacción táctil (háptica) entre ambos.

4.1. Grafito

La punta del lápiz está modelada como un volumen implícito que se discretiza en un conjunto finito de vóxeles que conforman una rejilla regular en un espacio euclídeo simulando las millones de partículas de grafito y arcilla que contiene una mina real. Esta representación es mostrada en la Figura 2.

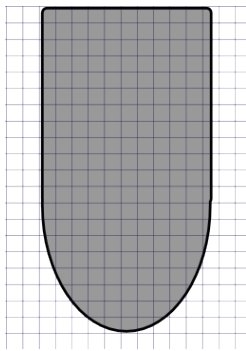


Figura 2: Representación de una mina mediante vóxeles. Cada voxel estará lleno o vacío según si tiene grafito o no.

Dada la partición del espacio, los vóxeles del volumen adoptan forma cúbica. La mina de grafito puede adoptar cualquier forma usando la función implícita adecuada: esférica, cilíndrica, cónica o una unión de diferentes poliedros, pudiendo simular cualquier mina real del mercado.

La mina tendrá además una dirección y sentido, que vendrá dada por la posición del dispositivo de entrada 3D que se usa para la interacción y por la orientación del mismo.

El volumen implícito que define la mina se discretiza en

el espacio de vóxeles del papel cada vez que es necesario localizarla, de forma que se puede saber la intersección entre la mina y el papel en cada momento conociendo la posición de referencia y la orientación del efector.

4.2. Papel

La superficie de dibujo viene determinada por otro volumen discreto de rejilla regular, siendo éste un cubo degenerado cuya profundidad es mucho menor que la anchura y la altura de la mina, tal y como muestra la Figura 3.

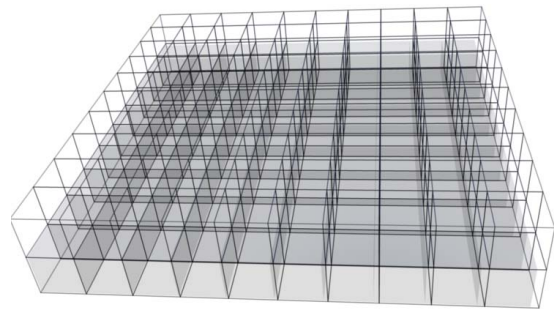


Figura 3: Representación de un folio de papel mediante vóxeles, cada voxel contendrá un valor que representará la cantidad de grafito que contiene.

El papel virtual tiene siempre una posición fija en el espacio, que se puede observar desde diferentes ángulos si se cambia la cámara de la escena, pero que no se desplaza en la interacción con el lápiz. Tiene una cara frontal o superior, sobre la que el lápiz se apoyará para producir los trazos.

4.3. Trazo

El trazo se define con el color de los vóxeles de la cara frontal del papel virtual. En las progresivas colisiones de la mina con la superficie de trabajo, el algoritmo estimará una cantidad de grafito a depositar, y cambiará el color de los vóxeles afectados acorde con las condiciones de entorno (velocidad, presión, etc.). La unión de los diferentes subconjuntos de vóxeles afectados en cada colisión define el trazo realizado. Las colisiones se producen a una frecuencia tal que incluso en un movimiento rápido se garantiza que puntos secuenciales en el tiempo afectarán a conjuntos de vóxeles adyacentes en el papel, derivando esto en la continuidad del trazo.

4.4. Interacción táctil

Como se describió brevemente en la sección en la descripción del problema, existen tres fuerzas características de todo sistema que muestre fricción, las cuales han de ser consideradas en la interacción táctil del lápiz y el papel: fuerza

de repulsión de la superficie de contacto, rozamiento estático y rozamiento dinámico. En el sistema interviene además una fuerza ejercida por el usuario, a la que nos referiremos como *fuerza de entrada* \vec{F}_i .

Componiendo las fuerzas de repulsión y de rozamiento se computará una *fuerza de salida* F_o , la cual será enviada al usuario y que proporcionará al usuario la sensación de estar efectivamente apoyando el lápiz contra la superficie de dibujo y de oposición a su desplazamiento por el mismo. Para renderizar esta fuerza de salida que se se utilizará un dispositivo háptico PHANTOM Desktop de seis grados de libertad para la entrada y tres grados de libertad para la salida, lo cual significa a efectos prácticos que disponemos de la orientación y posición del efector como parámetro de entrada y de una fuerza con dirección y módulo como parámetro de salida.

Para simular la componente de repulsión de la superficie sobre la que se dibuja es necesario saber la tensión aplicada por el usuario que sostiene el efector del dispositivo háptico. Al no estar esta fuerza disponible de forma directa, aplicaremos una abstracción típicamente usada en interacción háptica, [ZS95] que relaciona de forma unívoca un desplazamiento diferencial $d\vec{x}$ con un incremento en la fuerza $d\vec{f}$, esto es, la ley de Hook $\vec{F} = k \cdot \vec{x}$. La fuerza de repulsión es por tanto directamente proporcional a la distancia de penetración a la superficie. Utilizando una constante k lo suficientemente alta la superficie se comporta de forma similar a un material indeformable, puesto que una penetración en la superficie muy pequeña produce una fuerza de repulsión muy alta y la deformación elástica no es apreciable.

Las componentes de rozamiento estático y dinámico son independientes de la superficie de contacto y dependen tan sólo de la tensión aplicada entre las dos superficies de contacto:

$$F_e = \mu_e \cdot N \quad (1)$$

$$F_d = \mu_d \cdot N \quad (2)$$

donde F_e y F_d son las componentes de rozamiento estático y dinámico, siempre en la dirección opuesta al movimiento y paralelos a la superficie de contacto, μ_e y μ_d son los respectivos coeficientes de rozamiento y N es el vector de fuerza normal, que es en todo caso igual a la componente perpendicular a la superficie de la fuerza de entrada \vec{F}_i .

El sistema de fuerzas queda reflejado en la figura 4. Cuando el lápiz está apoyado sobre el papel y quieto es necesario vencer la fricción estática F_e para poder moverlo. Esta oposición se simulará de nuevo con una ley de Hook. Una vez que el lápiz esté en movimiento, la oposición al mismo vendrá dada por la fricción dinámica F_d .

5. Generación del trazo

En esta sección se describe nuestra aportación para generar una herramienta virtual de dibujado a lápiz.

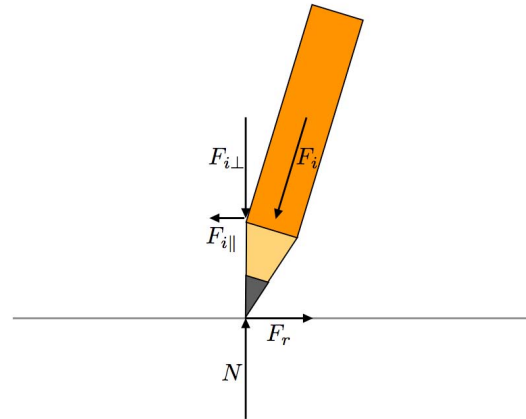


Figura 4: Esquema de las fuerzas que intervienen en el movimiento del lápiz sobre el papel.

Cuando se efectúa un trazo, es necesario realizar una serie de análisis determinados que medirán y determinarán la forma, color y tamaño del mismo. Estos análisis comprenden la comprobación de orientación de la mina, superficie de contacto entre el lápiz y el papel, presión, velocidad del movimiento de la mano y morfología del papel.

En términos de tareas computables, nuestro método realiza los siguientes pasos para determinar cada trazo:

1. Detección de colisión de la mina del lápiz con la el papel
2. Detección de la presión efectuada con el lápiz
3. Detección de la velocidad de trazado
4. Cómputo y generación de la fuerza de salida
5. Generación estocástica del grafito
6. Desgaste de la mina

En lo que sigue se describirán de forma detallada cada una de estas tareas.

5.1. Detección de colisiones

Es necesario saber en cada instante si existe alguna zona de la mina de grafito que está tocando el papel. Para ello utilizamos un escaneo en serie de los vóxeles de la corteza del la mina virtual (esto es, los vóxeles que no contactan con otro vóxel en al menos una de sus caras), tal y como muestra la Figura 5.

En el caso de que al menos un vóxel de la superficie de la mina interseque con los vóxeles del papel virtual tenemos que se ha producido una colisión y es necesario abordar el cómputo de la fuerza de salida.

En la fase de detección de colisiones se determina además cuántos vóxeles de la mina virtual están en contacto con el volumen del papel. Esto será determinante para el resultado final obtenido, ya que se pueden hacer trazos finos apoyando

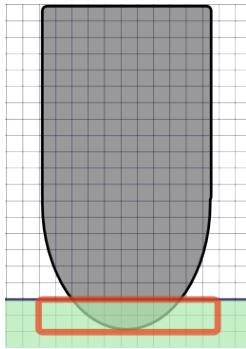


Figura 5: Intersección del lápiz con el modelo volumétrico del papel. Se recorren todos los vóxeles marcados en rojo para ver cuales contienen un trozo de la mina.

únicamente la punta de una posible mina cónica, o trazos gruesos si se inclina el lápiz para hacer que la mina contacte el papel de forma oblicua, tal y como se aprecia en la Figura 5.

Los vóxeles en los que se detecta colisión se marcan para, posteriormente, notificar al algoritmo de generación de grafito qué zona del papel es sobre la que debe actuar.

5.2. Presión efectuada con el lápiz

Como se apuntó en la descripción de la interacción táctil en el análisis del problema, la presión del lápiz se calcula como la penetración del efector del dispositivo háptico respecto de la superficie virtual de dibujo.

Esta presión tiene una doble funcionalidad. Por una parte se utiliza para computar las componentes de fricción estática y dinámica tal y como se explicó en la sección anterior, y por otra parte es un parámetro determinante en la generación del trazo, puesto que cuanto mayor sea la presión más intenso será el color del trazado y más desgaste habrá en la mina debido a que se soltará más grafito sobre el papel. Esta presión es calculada según la máxima profundidad que alcanzan los vóxeles de la mina, tal y como muestra la Figura 6.

La cantidad de grafito depositado sobre el papel depende de un valor constante definido para cada tipo de lápiz.

5.3. Detección de la velocidad de trazado

En sistemas hápticos suele haber rebotes minúsculos que podrían hacer que nuestro lápiz se comportara de forma poco creíble al tener cientos de rozamientos sobre el papel en un pequeño espacio físico. Es por ello que se define una constante ϵ que se comporta como valor umbral para determinar a partir de qué posición se considera que el lápiz se ha movido. Esto evita el dibujado de trazos cortos y extraños además del desgaste de la mina producidos por las pequeñas vibraciones del pulso.

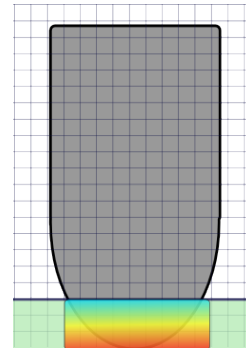


Figura 6: Cálculo de la presión según la profundidad que alcanza la mina. En azul indica poca presión, mientras que en rojo indica una presión elevada.

Tras la detección de colisiones se comprueba el desplazamiento que se ha producido, independientemente de las fuerzas implicadas en el mismo. Si el desplazamiento es menor a ϵ no se genera un trazo. En otro caso se debe generar un trazo entre las dos posiciones de la mina en el intervalo de tiempo Δt . Este Δt será también determinante en la generación del trazo, puesto que los trazos lentos y cortos difieren de los trazos rápidos que cubren una gran distancia.

5.4. Cómputo de la fuerza de salida

La relación entre las componentes de fricción \vec{F}_e y \vec{F}_d así como la fuerza de repulsión \vec{N} vienen determinadas por la presión que aplica el usuario sobre el papel \vec{F}_i .

Para calcular \vec{F}_i obviaremos el modelo volumétrico y consideraremos la herramienta como puntual. De este modo se puede calcular fácilmente la penetración \vec{x} como la máxima profundidad que alcanzan los vóxeles de la herramienta. Esta profundidad se calcula como la diferencia de desplazamiento entre el primer punto de contacto y la posición actual del efector. La fuerza de repulsión \vec{N} es la componente normal a la superficie de \vec{F}_i .

Una vez determinada \vec{N} las fuerzas de fricción son triviales, puesto que los coeficientes de fricción μ_e y μ_d son conocidos e intrínsecos de los materiales involucrados en la interacción (papel y grafito).

El lápiz se moverá e iniciará el trazo cuando se venza el equilibrio estático: $\vec{F}_i > \vec{F}_e + \vec{N}$.

5.5. Método estocástico para la generación de grafito

El algoritmo aquí propuesto se basa en los métodos de Monte Carlo, los cuales se han utilizado en múltiples ocasiones para la generación de imágenes realistas por computador [JC95]. En este tipo de métodos se puede decidir en cada paso cuando una solución es falsa pero no se conoce con

certeza cuando es verdadera. Por tanto, el algoritmo itera un cierto número de veces hasta llegar a una solución aproximada [BB97].

Si analizamos la intensidad del trazo de un lápiz real obtendremos una gráfica similar a la mostrada en la figura 7. En ella podemos apreciar que salvo en los bordes, el resto de datos sigue una distribución normal muy ancha o una distribución uniforme. Se han probado ambas funciones de probabilidad y la que mejor resultado ofrece es una función uniforme.

Si tenemos en cuenta que la cantidad de grafito que se exfolia sobre el papel cuando se dibuja un punto es finita, y que la probabilidad de que algo de grafito manche en el papel depende de ciertos parámetros físicos, podemos definir la función de densidad probabilística (FDP) [MM03] en términos de las gráficas anteriores. La mayor probabilidad de que caiga grafito está representada por el punto más alto de la gráfica, mientras que las partes más bajas indican menor o nula probabilidad de que caiga grafito. En todo caso se cumple que: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$, donde $f(x)$ es la FDP definida en una dimensión. Para dos dimensiones se cumple que: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)dxdy = 1$.

Hay que tener en cuenta que la función de densidad de probabilidad tiene un área de 1 ya que si lanzamos un elemento siempre cae en alguna región del espacio de soluciones.

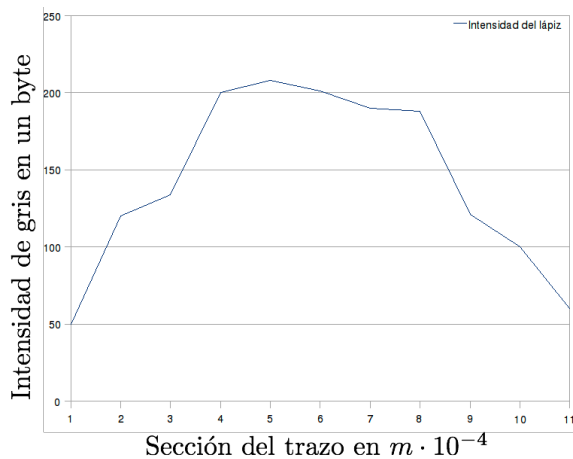


Figura 7: Gráficas de intensidad asociadas a una de las secciones transversales de un trazo, esta gráfica corresponde a la FDP asociada al grafito dejado sobre el papel de un lápiz real.

El algoritmo diseñado debe copiar los valores de la gráfica 7, así pues, se ha realizado una función generadora ($Gr()$) que devuelve valores aleatorios en el intervalo $[h_d - 0,1, h_d + 0,1]$ con la misma probabilidad que se indica en la misma. El valor h_d determina la dureza de la mina (o la

cantidad de arcilla que tiene la misma). Así pues, una mina blanda puede representarse con $h_d = 0,1$ mientras que una dura puede tener asociado un valor $h_d = 0,8$.

El algoritmo para la distribución del grafito es simple. En la etapa de detección de colisiones se marcaron los vóxeles del papel que intersecan con la mina, y por tanto debemos generar grafito en cada uno de ellos:

- Para cada voxel del papel que interseca con la mina:
 - Obtenemos $x = Gr()$
 - Aplicamos la presión (pr): $c = pr \cdot x$
 - Restamos c al valor del lienzo

Donde c es un valor entre 0 y 1 que indicará el nivel de intensidad que se resta al voxel del papel. Al reducirse la intensidad de la zona de colisión el papel se oscurece, simulándose así el grafito que se deposita sobre el papel al pasar la mina.

5.5.1. Simulación del papel

El papel en unas ocasiones impide el desplazamiento del lápiz y en otras ocasiones lo ayuda. Para ello podemos calcular el gradiente a partir de un mapa de elevación que simula los valles y montañas del papel, tal y como muestra la Figura 8. Esto permite simular técnicas como el calco de una moneda con lápiz y papel.

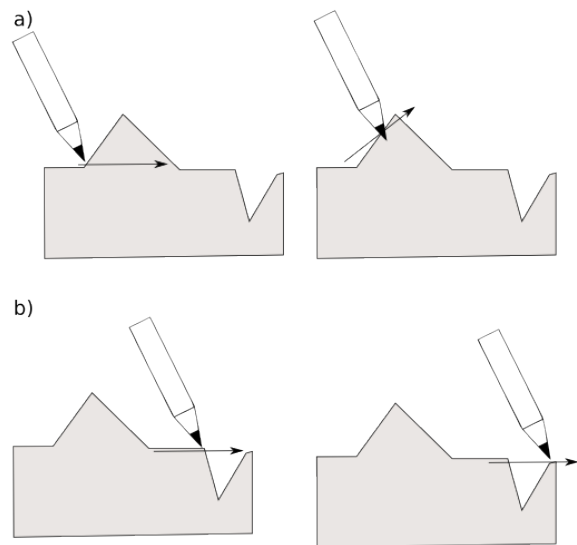


Figura 8: a) El lápiz lleva una trayectoria, se encuentra una montaña (izquierda), por tanto la presión aumenta con el choque y vuelve a normalizarse (derecha) dejando más cantidad de grafito; b) El lápiz lleva una trayectoria y encuentra un valle (izquierda), debido a la inercia, lo salta (derecha)

Por tanto, esto afecta al algoritmo anterior ya que podemos calcular el valor de la dirección del papel mediante la

dirección y la magnitud (m) del gradiente calculado ($\vec{\nabla}f$) sobre la imagen del papel.

Multiplicando la magnitud del gradiente por el color podemos obtener el oscuro producido por la erosión del grafito en caso de que la dirección del lápiz se oponga a la del gradiente: $c = pr \cdot x \cdot m$.

En caso de que la dirección tenga una dirección opuesta se realiza la operación contraria debido a la dificultad de soltar grafito en un valle: $c = \frac{pr \cdot x}{m}$.

5.6. Desgaste de la mina

La mina sufre un desgaste producido por el rozamiento del grafito con el papel. Está directamente relacionado con la dureza de la misma, tal y como se ha comentado en secciones previas.

Este desgaste se ve reflejado en la desaparición de algunos de los vóxeles de la corteza de la mina virtual. Esto sucede tras un número arbitrario de colisiones con el papel, tras el cual se supone que esa zona de la mina se ha desgastado y por tanto deja de existir (se ha esparcido por el papel). Para ello se utiliza una variable aleatoria que determina cuándo se eliminan los vóxeles que están en contacto con el papel. Esta variable depende de la dureza de la mina, por tanto, cuanto más blanda, más probabilidades habrá de que una parte importante de la misma se pierda en el papel, tal y como muestra la Figura 9.

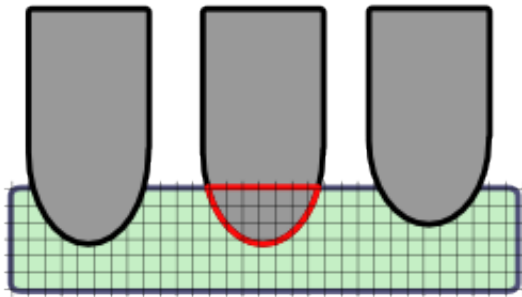


Figura 9: La mina choca con el papel (izquierda), y hay una probabilidad de que se gaste (centro), si esto sucede, los vóxeles del exterior de la herramienta se perderán (derecha) simulando el desgaste.

En colisiones subsiguientes, serán los vóxeles inmediatamente interiores los que colisionarán con el papel virtual, siendo éstos entonces susceptibles de ser erosionados. Se produce así un desgaste en cadena que simula la erosión de la mina de grafito tras fricciones sucesivas con el papel.

6. Implementación y resultados

Para la obtención de resultados se ha diseñado una aplicación que implementa los procedimientos anteriormente descritos. La aplicación se estructura en diferentes hebras, que

se encargan de las diferentes tareas como son la visualización de los volúmenes (papel y lápiz), el cálculo de colisiones, la materialización del trazo y la computación de la respuesta háptica.

La hebra de colisión activa el trazo en cuanto detecta una intersección entre la mina y el lápiz. En ese momento se calculan la presión y la velocidad (tiempo transcurrido desde la última colisión) si procede, y se llama al método de generación estocástica del grafito con los vóxeles afectados en la colisión. Finalmente se lanza la función de probabilidad del desgaste y se modifica la mina si es necesario. Esta hebra se ejecuta a un promedio de 13,2kHz, incluyendo cada ciclo la detección de colisiones, cómputo de parámetros y dibujado. Las pruebas se han hecho en un procesador Intel QuadCore Xeon a 2,5GHz y un dispositivo háptico PHANTOM Desktop de Sensable. Las colisiones por segundo detectadas son independientes del tamaño del volumen utilizado para el papel, puesto que éstas dependen únicamente del tamaño de la mina.

En las simulaciones hechas para comprobar la veracidad y realismo de los resultados obtenidos se aprecia que los trazos generados por nuestro algoritmo usando distintos tipos de lápiz se acercan a los resultados que se pueden obtener en la realidad (Figura 10). Se puede comprobar cómo el grosor del trazo es variable, según la mina y su orientación, y cómo se pueden dibujar trazos de distintas intensidades aumentando o disminuyendo la presión del lápiz virtual sobre el papel.

En la Figura 11 pueden asimismo comprobarse los resultados obtenidos al cambiar el papel de fondo y rayar sobre el mismo. En la misma figura se muestra una imagen real obtenida al rayar con un lápiz sobre una moneda real.

La implementación del desgaste puede observarse en la Figura 12. Ahí se muestra cómo el lápiz va quedando más redondeado conforme se va gastando la mina, suavizándose el trazo debido a la menor presión producida.

La aplicación se maneja de forma intuitiva y fácil utilizando el puntero del dispositivo háptico como método de interacción. El efector sirve tanto para mover el lápiz virtual en el espacio 3D como para recibir la respuesta en fuerza, en caso de tocar el papel virtual. En la Figura 13 se puede observar la aplicación en uso.

7. Conclusiones

Tras la descripción de las anteriores alternativas que han tratado de representar el trazo de un lápiz de grafito, se ha expuesto nuestra propuesta para simular el mismo, que aporta conceptos novedosos tales como la influencia de la presión en el trazado, el desgaste de la mina o la orientación del lápiz para definir el resultado final. Adicionalmente se ha propuesto un sistema de representación volumétrica para los elementos que intervienen en el problema, además de un modelo táctil de interacción que permite utilizar el método propuesto en aplicaciones de dibujo en tiempo real.

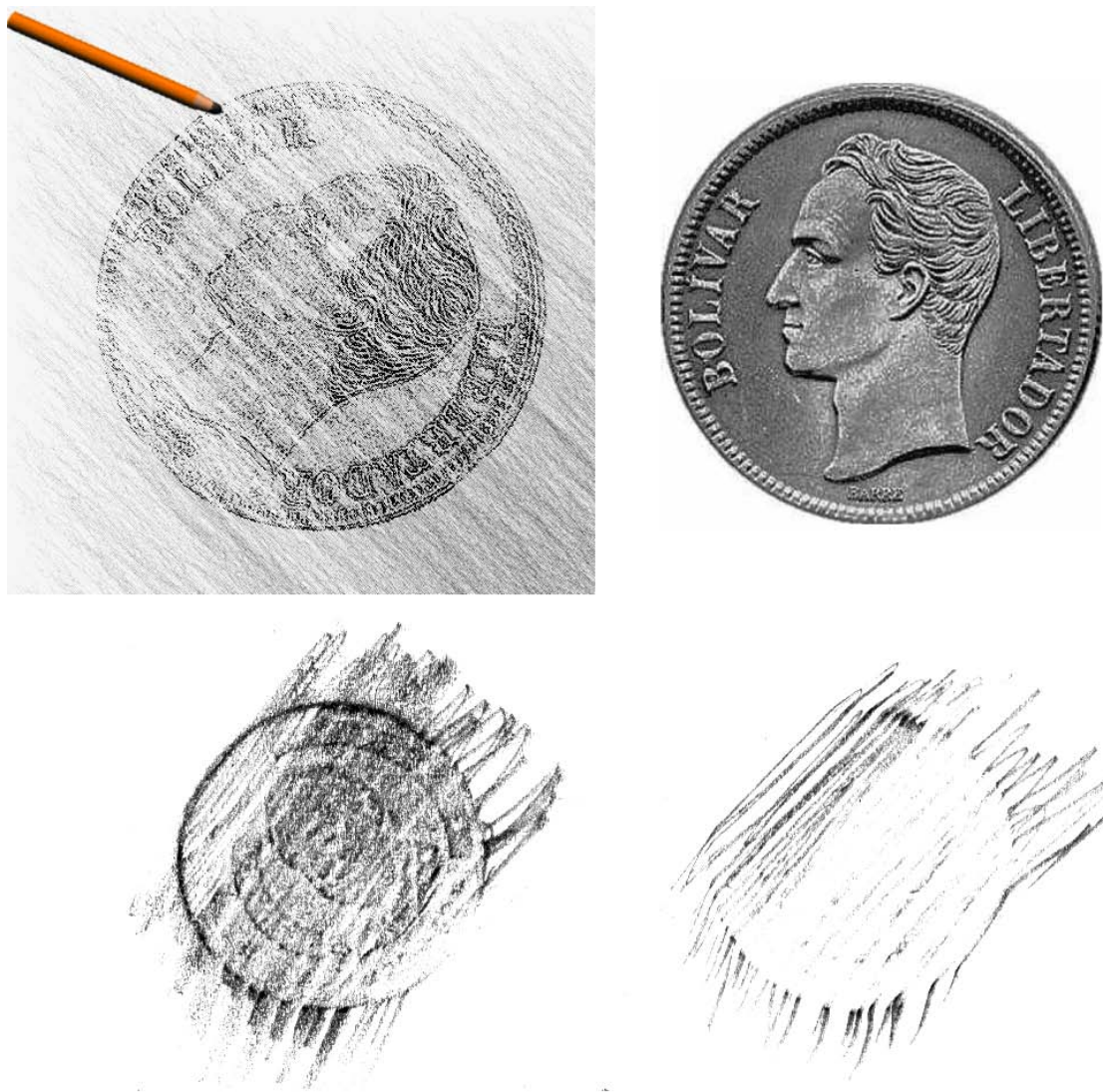


Figura 11: Simulación obtenida con nuestro programa tras aplicar un papel con la fotografía de una moneda (arriba). Se puede observar el realismo de nuestro algoritmo con respecto a lo que sucede en la realidad (abajo).



Figura 12: El esquema en azul representa el estado de la mina según se va avanzando en el trazo sobre el papel. Se puede observar como el lápiz va perdiendo presión a medida que la punta se va redondeando.

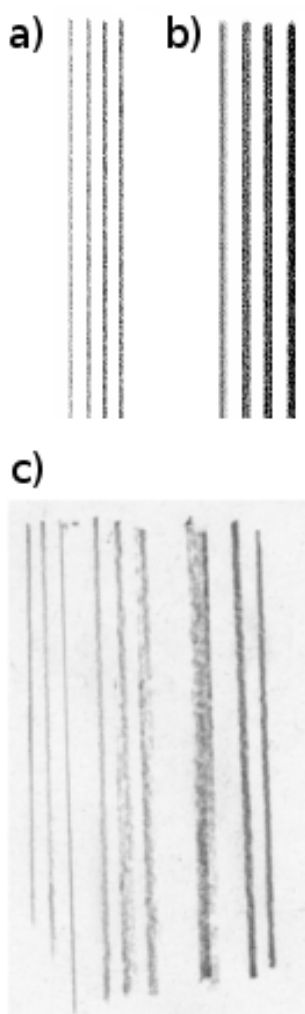


Figura 10: Simulación de distintos lápices: a) Lápices duros (tipo H); b) Simulación de varios lápices blandos (tipo B); c) Distintos trazos escaneados a 300 puntos por pulgada sobre un papel oscuro.

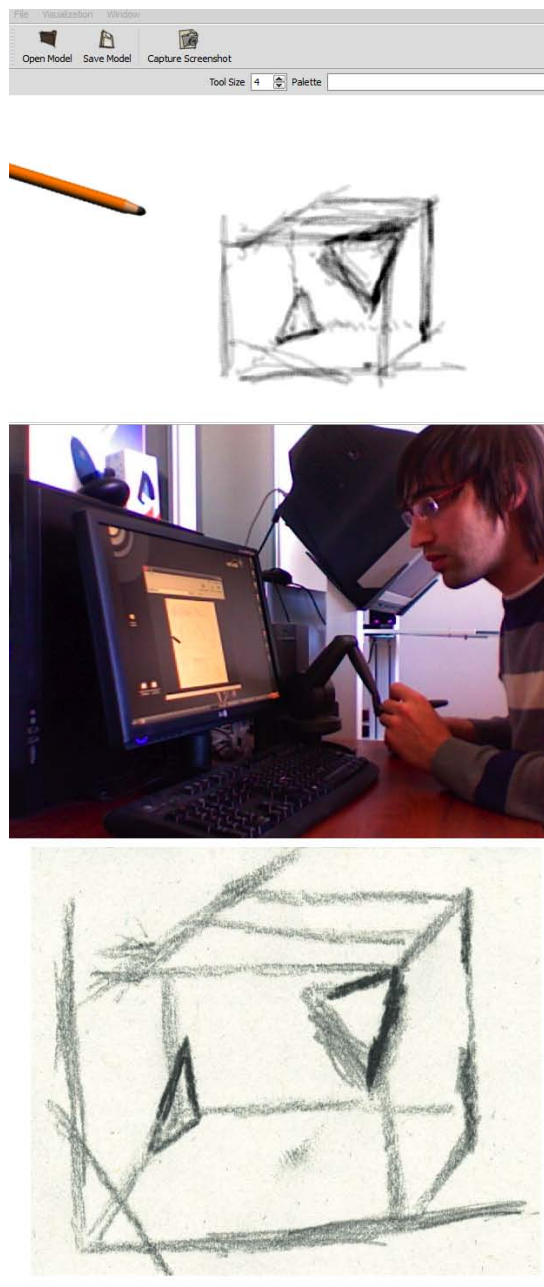


Figura 13: Fotografía de la aplicación funcionando en un sistema háptico. A la derecha, captura de la aplicación tras dibujar algo en ese mismo momento. Abajo, modelo dibujado por un artista y escaneado a 300 puntos por pulgada.

La aplicación propuesta consigue efectos parecidos a la realidad tanto en la impresión visual (trazado, variación en la presión y orientación del lápiz) como en la táctil, gracias al modelo de rozamiento. Esto tiene consecuencias directas en la experiencia del usuario al usar el grafito virtual, convirtiéndolo en una acción realista, además de intuitiva.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración prestada por el ilustrador Pedro Arroyo, así como a Francisco R. Bautista su aportación en los fundamentos físicos. Agradecimientos al Ministerio de Educación y Ciencia, por el proyecto TIN2007-67474-C03-02 que ha financiado este trabajo. También agradecemos a los revisores sus comentarios y sugerencias para mejorar este artículo.

References

- [BA70] BABOR J. A., AZNÁRES J. I.: *Química General Moderna*. Marín, 1970.
- [BB97] BRASSARD G., BRATLEY P.: *Fundamentals of Algorithms*. Prentice Hall, 1997.
- [CLR*04] CHEN H., LIU Z., ROSE C., XU Y., SHUM H.-Y., SALESIN D.: Non-photorealistic animation and rendering. In *Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering* (2004), pp. 95 – 153.
- [DH80] DODSON C. T. J., HERDMAN P.: Mechanical properties of paper. *Handbook of Paper Science* (1980).
- [Her01] HERTZMANN A.: Paint by relaxation. In *Proceedings of CGI'01: Computer Graphics International 2001* (Washington, USA, 2001), IEEE Computer Society, pp. 47–54.
- [IS94] INKENBACH G. W., SALESIN D. H.: Computer generated pen and ink illustration. In *Proceedings of SIGGRAPH* (July 1994), pp. 469–476.
- [JC95] JENSEN H. W., CHRISTENSEN N. J.: Photon maps in bidirectional monte carlo ray tracing of complex objects. *Computers and Graphics* 19, 2 (1995), 215–224.
- [LKL06] LEE H., KWON S., LEE S.: Real-time pencil rendering. In *Non-Photorealistic Animation and Rendering archive Proceedings of the 4th international symposium on Non-photorealistic* (2006), pp. 37–47.
- [MM03] MOORE D. S., MCCABE G. P.: *Introduction to the Practice of Statistics*. W.H. Freeman & Company., 2003.
- [MTXS06] MELIKHOV K., TIAN F., XIE X., SEAH H. S.: Dbsc-based pencil style simulation for line drawings. In *Proceedings of the 2006 international conference on Game research and development* (Perth, Australia, 2006), pp. 17 – 24.
- [SB99] SOUSA M. C., BUCHANAN J.: Computer-generated graphite pencil rendering of 3d polygonal models. In *EUROGRAPHICS'99* (1999), Brunet I. P., editors R. S., (Eds.), vol. 18.
- [See03] SEEGMILLER D.: *Digital Character Design and Painting*. Graphics Series, 2003.
- [SFYZ04] SEARS F., FREEDMAN R., YOUNG H., ZEMANSKY M.: *Física universitaria*. Pearson, 2004.
- [Sim00] SIMMONS M.: *The Pencil Hardness Test*. Woodwork, April 2000.
- [TFN99] TAKAGI S., FUJISHIRO I., NAKAJIMA M.: Volumetric modeling of colored pencil drawing. In *Pacific Graphics '99* (Seoul, Korea, 1999), pp. 250–258.
- [Woo94] WOOD P.: *Scientific illustration, second edition*. Vand Nostrand Reinhold, 1994.
- [ZS95] ZILLES C., SALISBURY J.: A constraint-based god-object method for haptic display. vol. 3, pp. 146–151 vol.3.