

Generación estocástica de puntos para técnicas de punteado automático

Germán Arroyo, Domingo Martín, M. Victoria Luzón

arroyo@ugr.es, dmartin@ugr.es, vluzon@ugr.es
Dpto. de Lenguajes y S. I., Universidad de Granada, 18071 Granada, Spain

Abstract

Los trabajos recientes en la visualización expresiva han producido resultados comparables a los creados a mano. Sin embargo, cuando se intenta replicar mediante un ordenador un original realizado por un artista, se comprueba que existen diferencias importantes entre ambas imágenes, principalmente debido a la regularidad de los puntos usados en las técnicas automáticas para generarlas. Este artículo se centra en uno de los elementos clave del dibujo mediante punteado: el punto, su forma, color y tamaño. Este trabajo presenta un nuevo método para generar una cantidad ilimitada de puntos con una alta variedad para su uso en la obtención de dibujos mediante punteado por ordenador de forma automática y sin recurrir a texturas escaneadas. Los algoritmos aquí propuestos tienen en cuenta ciertos parámetros tales como la viscosidad y color de la tinta, la absorción del papel o la velocidad con la que el artista realiza el punto. También se demuestra visual y matemáticamente como los puntos generados se asemejan enormemente a los realizados por los artistas.

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

1. Introducción

El punteado es una técnica de dibujo artístico en la cual la imagen se genera mediante la distribución de puntos de distinta forma y tamaño para que transmitan la información de forma y tono del objeto representado. Una de las ventajas de este tipo de técnicas consiste en que permite imprimir con una sola tinta [Sec02a] [SFWS03]. 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 puntos y el uso de puntos más grandes [Woo94]. También puede dar cierto dinamismo a la escena deformando los puntos y haciéndolos más irregulares [Hod89] (Figura 1).

Hasta ahora, los métodos para generar punteado por ordenador se han centrado en la distribución de los puntos para generar la tonalidad deseada pero no en su forma. Trabajos recientes [MIA*07] [Mou07] han demostrado que, incluso simulando la tonalidad, el punteado no es parecido al original. Si examinamos la generación de imágenes de punteado

a partir de fotografías, la mayoría de los métodos utilizan sistemas basados en medios tonos para generar un bitono, o en el mejor de los casos, niveles de gris pero con puntos circulares simétricos.

En este artículo se presenta un nuevo método para la generación de puntos automáticos que posteriormente se pueden utilizar en programas de generación de punteado automático imprimiendo gran realismo (en el sentido de similitud con lo que un artista representa) debido a la similitud de los mismos.

También se comparan los resultados con puntos realizados por un artista de forma matemática (mediante la medida de similitud estructural) y visualmente (por comparación visual).

Se comenzará describiendo los trabajos previos, para luego analizar el problema del dibujado de puntos analizando lo que los artistas realizan a mano. Posteriormente se describirá el método y se presentarán los resultados y las conclusiones.

2. Trabajos previos

Existen numerosos trabajos previos en el campo de la visualización expresiva orientada al punteado. La mayoría de ellos se centra únicamente en la generación de gradientes de puntos para simular sombras en el modelo [Mou07]. Otros se centran en la generación del punteado mediante el posicionamiento correcto de los puntos y la evitación de patrones mediante algoritmos iterativos [Sec02b] [PFS04], o el posicionamiento de los puntos según la intensidad de la imagen [SHS02]. Sin embargo, trabajos recientes han demostrado que los métodos aún resultando estéticamente atractivos son fácilmente distinguibles respecto a los generados por los artistas [MIA*07] [DHOS00].

Un factor determinante para que el dibujo mediante punteado sea parecido al real es el punto. En general se ha prestado poca atención al punto en sí, y mucha a la distribución de los mismos, aunque algunos trabajos recientes inciden en la importancia del tamaño y forma de los mismos [MIA*07].

3. Objetivos

La técnica del dibujado mediante punteado ha sido tratado en numerosos trabajos [LMT*03] [Sec02b]. En la mayoría de ellos la principal preocupación ha sido la distribución de los puntos para generar imágenes de la misma tonalidad pero olvidan las otras dos importantes características del punto: forma y color. Este “olvido” ha llevado a que se produzcan imágenes que estéticamente sean agradables pero que son fácilmente identificables como realizadas por un ordenador.

Esto se debe a que los puntos que se han usado son básicamente circulares y en muchos casos de color negro o con pocos niveles de gris [GG01] [SGS05]. Esto contrasta extremadamente con lo que se puede ver en una obra hecha a mano: puntos irregulares, de distintos tamaños y con degradados, lo cual sólo refleja la interacción de la tinta con el papel al dibujar el artista [Hod89].

Simplemente cambiando los puntos regulares de la mayoría de los métodos con puntos escaneados a partir de un original hace que el dibujo cambie profundamente, volviéndolo más natural. Esto se puede hacer escaneando dibujos hechos a mano. Para no depender de un conjunto fijo de muestras, planteamos la generación automática de puntos, equivalentes a los escaneados, para su utilización en sistemas de punteado asistido por ordenador.

3.1. Descripción del problema

Una vez planteado de forma general nuestro objetivo, hacemos una descripción del problema.

Existen varios parámetros que afectan a la disposición de una mancha de tinta o punto cuando se posiciona una plumilla técnica sobre el papel:

1. Viscosidad de la tinta
2. Absorción del papel
3. Plumilla técnica y artista

De estos, el único que no puede ser analizado de forma técnica es la técnica del artista mediante dibujado con la plumilla.

Para el resto se puede analizar la ecuación física de la que depende o los parámetros que intervienen.

3.1.1. Viscosidad de la tinta

La viscosidad se suele definir como la resistencia de un fluido a cambiar de forma o a moverse. Esa resistencia se debe a la cohesión de las partículas que lo componen, que ejercen una especie de fricción interna que perturba el movimiento o cambio de forma.

Las ecuaciones de desplazamiento que afectan a la viscosidad son ecuaciones de resistencia que se ven afectadas por la temperatura y la presión [AB89] [FF01].

La cantidad de movimiento del líquido se puede expresar como:

$$\vec{P} = b \cdot \vec{v} \quad (1)$$

Donde b es la constante de viscosidad dependiente de la estructura física de líquido y v el vector de movimiento.

El problema de simular este parámetro es que habría que conocer la temperatura, presión y constante de viscosidad en cada momento en el que el artista decidió dibujar cada punto.

3.1.2. Absorción del papel

Existen trabajos previos en el ámbito de la simulación de la absorción de la tinta sobre el papel mediante la minimización de distintas ecuaciones de energía que funcionan bastante bien sobre trazos de tinta [Her01]. Este trabajo no puede ser aplicado directamente al comportamiento de la tinta para punteado ya que no existen trazos. En el caso de la simulación de acuarelas se utilizan texturas con distintos niveles de gris para calcular la absorción del papel [CAS*97], lo que permite realizar una simplificación sencilla de la absorción de cada una de las conexiones que realizan las fibras individuales que conforman el papel [DH80].

3.1.3. La plumilla técnica y el artista

El tamaño de la punta de la plumilla técnica es un elemento importante. Normalmente en punteado se suelen utilizar tamaños de entre 0.2 y 0.4 milímetros para la realización del dibujo, aunque depende del artista y del trabajo que dese realizar. El tamaño de la mancha puede variar, así como la forma ya que el artista puede detener la plumilla técnica más o menos tiempo sobre el papel y por tanto, aplicar más cantidad de tinta, como también mover la mano para generar puntos más irregulares. La mayoría de los trabajos

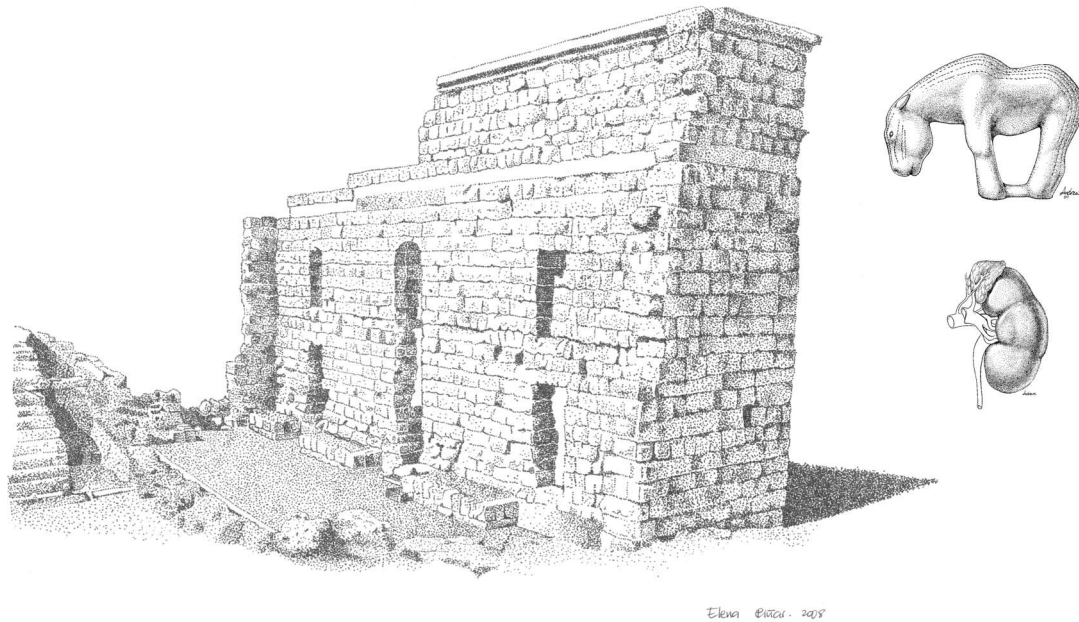


Figure 1: Imágenes dibujadas por distintos artistas.

previos se centran solamente en la distribución de los puntos sobre el papel [KW03] [Mou07] y solo algunos mencionan la importancia del tamaño de los puntos o de la forma [MIA*07].

El problema, por tanto, se encuentra en conseguir un medio para poder generar puntos de forma que no se produzcan patrones.

4. Análisis del problema

Para poder simular el punto, primero se requiere un análisis de los puntos generados por un artista. Para poder estudiar los puntos, los mismos se escanean y se almacenan en matrices de $n \times n$ píxeles. Comenzamos con un conjunto de 120 puntos escaneados a una resolución de 300 puntos por pulgada y 256 niveles de gris por píxel, a 12 tamaños distintos (desde 3 píxeles a 15 píxeles).

Si se analizan los valores de intensidad de cualquiera de estos puntos podemos clasificarlos en tres tipos según su forma:

1. Puntos regulares uniformes
2. Puntos con varios centroides
3. Puntos irregulares o no uniformes

En la Figura 2 se muestran estos tres tipos de puntos según su forma. La variedad de puntos es muy alta, esto nos indica que no existe una ecuación regular que sea válida para cualquier punto, por tanto es necesario un análisis estadístico.



Figure 2: Tipos de puntos de izquierda a derecha: regulares, varios centroides, irregulares.

Si analizamos cada punto realizado por el artista de forma individual podemos conseguir gráficas que nos indiquen la forma de la distribución de intensidad general que poseen cada uno de los elementos de estos tres conjuntos en cada uno de los ejes.

Las gráficas que se obtienen en el caso regular son gráficas bastante simétricas en torno a un punto central como puede apreciarse en la Figura 3, donde un valor de 255 significa el máximo de tinta posible y un valor de 0 significa ausencia de tinta.

Si tenemos en cuenta que la cantidad de tinta que cae en el papel cuando se dibuja un punto es finita, y que la probabilidad de que algo de tinta manche en el papel depende de ciertos parámetros físicos, podemos determinar que la función de densidad probabilística (PDF) es igual a la función definida por las gráficas anteriores. En todo caso se cumple que: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

Donde $f(x)$ es la PDF definida en una dimensión. Para dos dimensiones se cumple que: $\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)dxdy = 1$.

Esto significa que la mayor probabilidad de que se de-

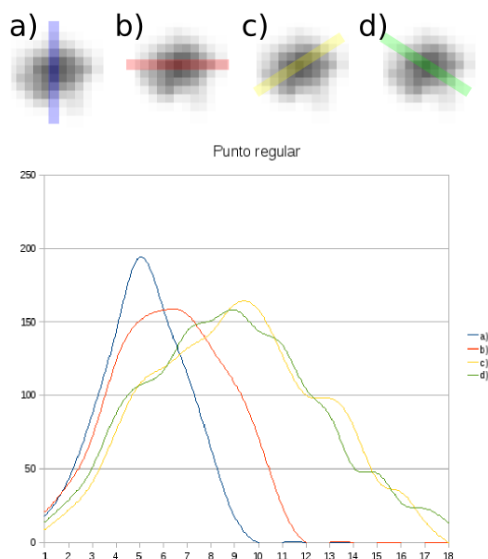


Figure 3: Gráficas de intensidad asociadas a un punto regular.

posite tinta es el punto más alto de la gráfica, mientras que las partes más bajas indican menor o nula probabilidad de que se deposite tinta.

En los puntos con varios centroides la PDF se vuelve multimodal, y en las irregulares la PDF se convierte en una función de densidad asimétrica como se muestra en la Figura 4, donde aparecen las gráficas de densidades representadas de forma tridimensional.

Se puede apreciar que los puntos con múltiples centroides se podrían obtener de varios puntos uniformes y que los irregulares en realidad deforman la función de probabilidad original haciéndola más irregular.

Se puede apreciar que todas las gráficas son parecidas a la función de Gauss, lo que demuestra que la probabilidad de que haya tinta depende de una distribución parecida a la distribución normal.

5. Algoritmo

En adelante se mostrará nuestra aportación para generar un número ilimitado y no repetitivo de puntos para técnicas de punteado basándonos en métodos estocásticos.

Nuestro método consta de los siguientes pasos:

1. Generación de puntos regulares mediante un método de Monte Carlo
2. Generación de puntos con varios centros mediante modificación de la PDF
3. Generación de puntos irregulares mediante modificación de la PDF

4. Balance de las intensidades

Los pasos de nuestro algoritmo se describen a continuación de forma detallada.

5.1. Método estocástico para la generación de puntos

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].

El algoritmo se puede dividir en los siguientes pasos:

1. Selección de las semillas
2. Mientras quede tinta:
 - a. Generar una posición aleatoria según la función $F_b(x)$ con $x \in [0, 1]$
 - b. Colocar tinta en la posición devuelta
3. Balance de las intensidades: se aplicará un filtro de imagen para suavizar el resultado (una matriz Gaussiana de bajo coeficiente)

La función $F_b(x)^0$ es una función de posicionamiento de los puntos. Toma un valor aleatorio entre 0 y 1 y devuelve una posición para colocar el centro del punto.

5.1.1. Generación de la semilla

Para la generación de la semilla se puede seguir una distribución normal ($N()$) de probabilidad. Es importante que dicha distribución esté centrada (tenga media 0.5) para que en el mayor número de casos la semilla se encuentre centrada. La desviación típica de dicha distribución no es relevante, ya que modificará el número de veces que la semilla aparecerá en la periferia. Para ello se genera una primera posición base $p_x = N()$ y $p_y = N()$ dentro de una rejilla de un tamaño como mínimo de 10×10 píxeles (ya que si es menor el algoritmo no tendrá espacio para expandirse adecuadamente).

Después se generan n elementos a su alrededor, donde n es un parámetro indicado por el usuario y que corresponde al tamaño de la semilla inicial. Todos los $n + 1$ elementos son equiprobables y su probabilidad se calcula como $P(p_x, p_y) = 1/(n + 1)$ para el primer punto y sus n vecinos. Después de calcular su probabilidad, ésta se introduce en una matriz del mismo tamaño que la rejilla original (matriz P) para su posterior consulta. Por tanto ésta matriz nos dará la función de probabilidad en cada momento. Todos los valores de la rejilla, salvo los dados por los $n + 1$ generados, toman un valor 0 de probabilidad, tal y como muestra la Figura 5.

La matriz P es una función de densidad de probabilidad (PDF) en sí misma ya que cumple que la suma de las probabilidades de cada una de sus celdas es exactamente 1. Una

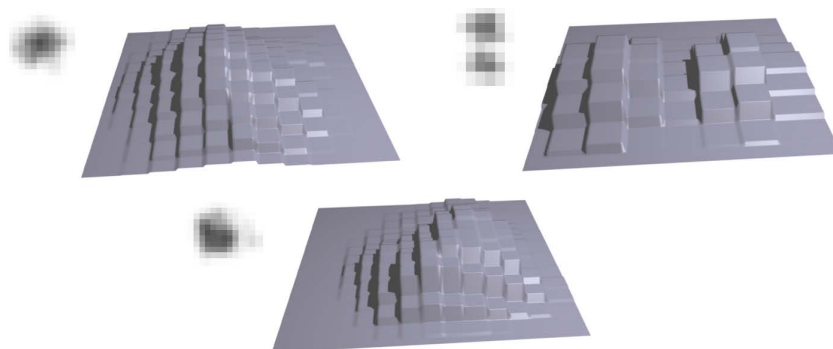


Figure 4: Gráficas de intensidad asociadas a un punto regular, un punto con varios centroides, y un punto irregular.

		$1/(n+1)$		
		$1/(n+1)$		
		$1/(n+1)$		

Figure 5: Matriz de probabilidades al comenzar el algoritmo. La probabilidad en los puntos blancos es 0. El resto tiene la misma probabilidad.

forma rápida de buscar elementos dentro de la misma es crear una lista indexada que se usará posteriormente. La lista L_p contiene la posición de todas las celdas de la matriz con probabilidad distinta de 0.

5.1.2. Estimación de F_b

Una vez generados los puntos semilla, en cada iteración se añade tinta basándose en una función F_b que toma como parámetro un número aleatorio $x \in [0, 1]$. x se obtiene de una función uniforme de probabilidad. Una forma sencilla de computar el resultado de la función $F_b(x)$ es la siguiente:

1. $i = 0$
2. Mientras $x \neq 0$:
 - a. Obtenemos p_x y p_y de $L_p[i]$
 - b. Si $x \leq P(p_x, p_y)$ entonces devolvemos (p_x, p_y) .
FIN DEL ALGORITMO.
 - c. En otro caso:

$$x = x - P(p_x, p_y)$$

$$i = i + 1$$

Al final obtendremos una posición que nos delimitará donde podremos situar la tinta. Para ir computando el resultado usaremos otra matriz, llamada matriz de intensidades

I , donde se almacenará el resultado parcial obtenido. Cada celda de I será un valor de intensidad en el intervalo $[0, 1]$. Si restamos una cierta cantidad $k \in [0, 255]$ delimitada por el color de la tinta tendremos el resultado de aplicar la punta inmóvil de una plumilla técnica sobre un papel que absorbe el 100% de su tinta. Obviamente este tipo de papel no existe y el resultado sería el que se muestra en la Figura 6, para una cantidad alta de iteraciones (por ejemplo 200 iteraciones).

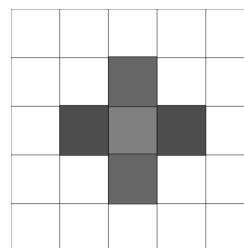


Figure 6: Se muestra como la tinta se distribuye de forma aleatoria por las celdas donde la probabilidad es distinta de 0.

5.1.3. Generación del papel y viscosidad

El problema de la solución anterior es que no existe en la realidad ningún papel que absorba toda la tinta. Por tanto la absorción (A) del mismo es un factor relevante para la generación de puntos. Además, la viscosidad (v) de la tinta suele ser baja, lo que hace que permita expandirse por papeles poco o nada absorbentes.

Por todo ello, el algoritmo anterior es modificado para que la función P cambie en cada iteración:

1. Tomamos x de una función de probabilidad uniforme en $[0, 1]$
2. $c = P(p_x, p_y) \cdot v$
3. Si $x < v$ entonces $P(p_x, p_y) = P(p_x, p_y) - c$

En este punto del algoritmo, se elimina cierta probabilidad c debido a la pérdida de tinta por la ausencia de viscosidad. Esta tinta se reparte entre los vecinos con una probabilidad dada por la cercanía de dichos vecinos, tal y como se muestra en la Figura 7.

La probabilidad de las casillas cercanas aumenta para $d = \frac{c}{6}$ y para $e = \frac{c}{12}$, cumpliéndose que $4d + 4e = c$. Por tanto, la función P sigue siendo una PDF.

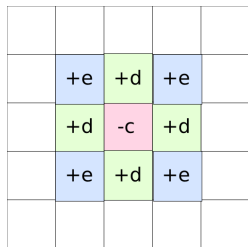


Figure 7: c es la probabilidad perdida por la casilla central. d es la probabilidad ganada por las casillas cercanas y e la ganada por las casillas lejanas.

De la misma forma, se puede introducir una matriz de absorción que indique cuando una celda no admite más tinta (su probabilidad se vuelve 0), basándonos en la cantidad de tinta que ya tiene almacenada. Esto se puede verificar mediante la matriz de intensidades cuando se resta el parámetro k a la celda de la matriz de intensidades (I).

1. Si $I(p_x, p_y) \leq A(p_x, p_y)$ entonces $c = c + P(p_x, p_y)$

Sumando a c el valor de la probabilidad de la celda actual haría que la celda tuviera probabilidad 0. El algoritmo de distribución de probabilidad sería el mismo que el explicado anteriormente para la viscosidad.

Podemos ver en la Figura 8 el funcionamiento del algoritmo básico: a) se genera la semilla, las matrices de intensidad (I) y absorción (A) no se modifican, se actualiza la de probabilidades para que todas las celdas sean equiprobables b) las probabilidades cambian según la matriz de absorción y la viscosidad de la tinta, lo que hace que las probabilidades de caer tinta en la matriz de intensidad se modifiquen en cada interacción, c) los valores de intensidad se actualizan sobre la matriz de intensidad según la probabilidad dada.

Puede suceder que una casilla se vacíe de probabilidad y sus vecinas tengan probabilidad 0 aunque la intensidad de las mismas sea distinto de 0 (debido a que no admitan más tinta). En ese caso, se aplica el criterio de expansión recursivamente a las celdas vecinas, hasta que haya celdas que admitan dicha probabilidad. En caso de que no haya celdas con probabilidad distinto de 0 significaría que el papel no puede absorber más tinta, por tanto el algoritmo acabaría.

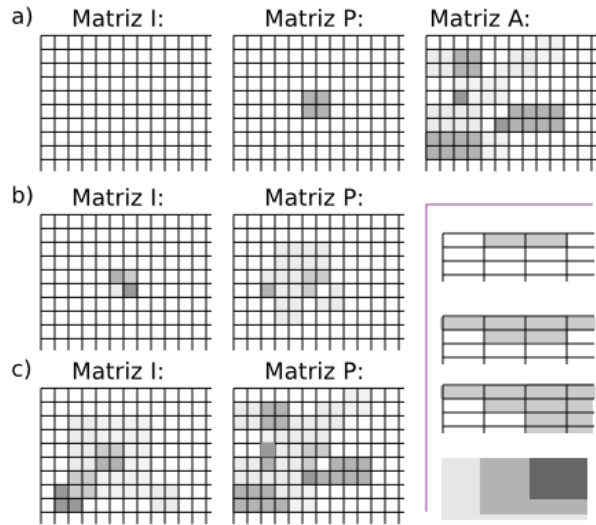


Figure 8: Tres pasos del algoritmo mostrados como esquema. Se puede comprobar a la derecha abajo como la matriz de intensidad recoge en realidad el número de impactos de la tinta sobre el papel. Un mayor número de impactos hará que el papel se oscurezca.

5.2. Generación de puntos no uniformes

El problema de esta técnica es que todos los puntos aparecen muy regulares, debido a que el criterio de expansión se propaga equiprobablemente apareciendo irregularidades solamente debido a la absorción del papel. Sin embargo, cuando los artistas quieren imprimir a las obras un mayor dinamismo, es común que, el tiempo de exposición y la posición de la plumilla técnica, así como pequeños movimientos del mismo sobre el papel, deformen el punto de una forma arbitraria. Es por esto que al algoritmo anterior se le introduce un parámetro al que llamamos estrés. Este parámetro puede ser definido por el usuario mediante máscaras, o bien, ser aleatorio.

Para la generación de estos puntos irregulares se dará una dirección (α) y un parámetro de deformación (s_d) que indicará una posición P_s hacia la cual tenderá la propagación de la mancha, tal y como muestra la Figura 9.

El algoritmo que modifica las probabilidades en cada iteración es el siguiente:

1. Si $s_d > 0$ entonces:
 - a. Para cada elemento l de L_p :
 - i. Calculamos la suma de la distancia (d_{sp}) a la semilla y al punto de estrés P_s

De entre todas las probabilidades de la lista, tomamos la probabilidad del punto con una mayor distancia y la sumamos al punto de menor distancia. Dejamos a 0 la probabilidad del punto de mayor distancia y lo sacamos de la lista.

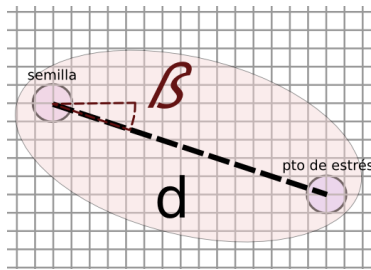


Figure 9: El punto de estrés se calcula a partir de un ángulo y un parámetro que marca una distancia desde el primer punto semilla.

Puesto que esto se realiza en cada iteración, los puntos que están en la línea entre el punto semilla y el punto de estrés tendrán mayor probabilidad de que la tinta caiga ahí.

Otra posibilidad es la de crear nuevos núcleos semilla secundarios al iniciar el algoritmo, esto permite la creación de puntos con varios centroides sin tener que modificar el algoritmo.

6. Implementación y resultados

Para todas las pruebas presentadas se ha realizado una aplicación en C++ que funciona en sistemas tipo Linux y que toman una fotografía contrastada como entrada. El algoritmo usado como base utiliza un medio tono a partir de la imagen de fronteras y la imagen altamente contrastada [FMS02]. A partir del medio tono se han variado ligeramente las posiciones de los puntos de forma aleatoria y se han sustituido por los puntos generados por nuestro método.

El resultado de un conjunto de puntos generados sintéticamente con nuestro algoritmo puede compararse con un conjunto tomado de una ilustración real (en este caso la ilustración de las ruinas de la Figura 1) en la Figura 10, no apreciándose una gran diferencia perceptiva entre los mismos.

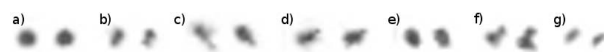


Figure 10: Comparativa de pares de puntos, generados con nuestro método (a izquierda) y los puntos de una ilustración real (a derecha).

Podemos ver en la Figura 11 como afecta el parámetro de estrés sobre los puntos regulares (arriba), aumentando la cantidad de estrés (medio) y aumentando finalmente el número de núcleos para un papel y para otro más absorbente.

Una medida bastante fiable es la medida de similitud estructural [WBSS04]. Esta técnica compara dos imágenes analizando su distribución local, el color, etc. Un valor 1 indica que las imágenes son iguales, 0 que son completamente

Puntos regulares:



Puntos irregulares:



Puntos irregulares varios núcleos (papel poco absorbente):



Puntos irregulares varios núcleos (papel absorbente):



Figure 11: Resultados variando el parámetro de dispersión, la cantidad de núcleos y el papel. El resto de parámetros se han mantenido en las tres muestras.

distintas. Se ha realizado una generación de 1.000 puntos generados con nuestro algoritmo, con las mismas características de color de tinta y de absorción de papel, y los resultados obtenidos tras aplicar una medida de similitud estructural se muestran en la gráfica 12. Se puede apreciar que el promedio de similitud es muy alto. En la gráfica 13 se puede apreciar el resultado de aplicar 10 puntos cogidos al azar de la Figura 1 y otros 10 puntos generados por el artista y obtenidos de la Figura 14 tras aplicar la medida de similitud estructural sobre todos los puntos de la imagen 1. Objetivamente obtenemos medidas de similitud casi idénticas a las obtenidas con los puntos reales, lo que significa que los puntos son casi exactos a los que los artistas realizan en punteado.

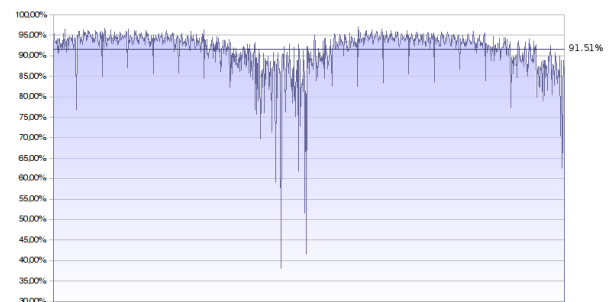


Figure 12: Gráfica comparativa de similitud entre 1.000 puntos generados y los puntos del acueducto de la Figura 1. Se puede observar el promedio del 91.5% de acierto con respecto a los puntos generados por el artista.

Se puede observar en la Figura 14 como los puntos son también visualmente parecidos a los que realiza un artista. Estos puntos se han obtenido modificando parámetros de iteraciones, número de núcleos y el estrés. Merece la pena

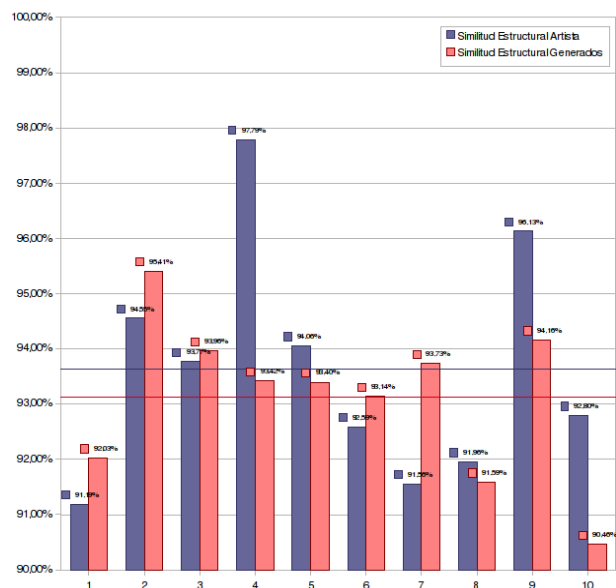


Figure 13: Gráfica comparativa tras aplicar la medida de similitud estructural a los puntos de la Figura 1. Las líneas rectas indican el promedio de cada una de las gráficas.

observar como aunque los puntos están centrados de forma regular a lo largo de la imagen, no aparecen patrones.

En la Figura 15 se muestra una imagen obtenida mediante una aplicación basada en un algoritmo de medios tonos parecido al trabajo de [DHOS00], donde cada píxel obtenido se modifica por puntos generados por nuestro algoritmo y movidos unas cuantas posiciones. El resultado como puede apreciarse, es convincente incluso modificando el color de salida para que los puntos aparezcan de color sepia (Figura 16).

7. Conclusiones

Se ha presentado un método que permite generar puntos casi idénticos a los que realizan los artistas en técnicas de punteado. Esta generación de puntos se realiza mediante un algoritmo estocástico iterativo que utiliza una función de densidad probabilística adaptativa ajustada a un conjunto real de puntos realizados por artistas, lo que permite generar gran variedad de puntos de forma sencilla.

También se ha presentado la aplicación que permite la generación de imágenes de punteado con dicho generador y que ofrece un efecto realista en las figuras generadas con distintos tamaños y formas en los puntos.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración prestada por la ilustradora Elena Piñar Toro. Agradecimientos al Ministerio

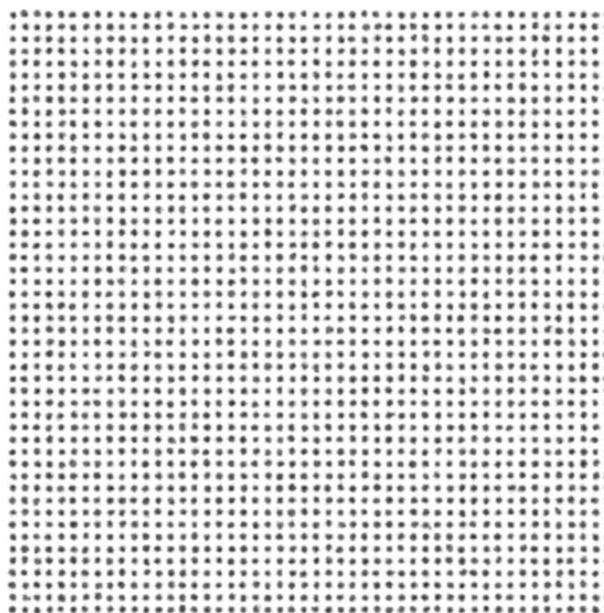


Figure 14: Matriz de puntos generados mediante nuestro algoritmo con parámetros de absorción, núcleos y estrés aleatorios.

de Educación y Ciencia, por el proyecto TIN2007-67474-C03-01 y el proyecto TIN2007-67474-C03-02 que han cofinanciado este trabajo. También agradecemos a los revisores sus comentarios y sugerencias para mejorar este artículo.

References

- [AB89] ABBOT M., BASCO D.: *Computational Fluid Dynamics - An Introduction for Engineers*. Longman, 1989.
- [BB97] BRASSARD G., BRATLEY P.: *Fundamentals of Algorithms*. Prentice Hall, 1997.
- [CAS*97] CURTIS C. J., ANDERSON S. E., SEIMS J. E., FLEISCHER K. W., SALESIN D. H.: Computer-generated watercolor. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (1997)*, pp. 421–430.
- [DH80] DODSON C. T. J., HERDMAN P.: Mechanical properties of paper. *Handbook of Paper Science* (1980).
- [DHOS00] DEUSSEN O., HILLER S., OVERVELD C. V., STROTHOTTE T.: Floating points: A method for computing stipple drawings. *Computer Graphics Forum 19* (2000), 40–51.
- [FF01] FOSTER N., FEDKIW R.: Practical animation of liquids. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH* (2001), pp. 23–30.
- [FMS02] FREUDENBERG B., MASUCH M., STROTHOTTE T.: Real-time halftoning: A primitive for non-photorealistic shading. In *Eurographics Workshop on Rendering* (2002), pp. 1–4.
- [GG01] GOOCH B., GOOCH A.: *Non-photorealistic Rendering*. A. K. Peters, July 2001.
- [Her01] HERTZMANN A.: Paint by relaxation. In *Proceedings of CGI'01: Computer Graphics International 2001* (Washington, USA, 2001), IEEE Computer Society, pp. 47–54.

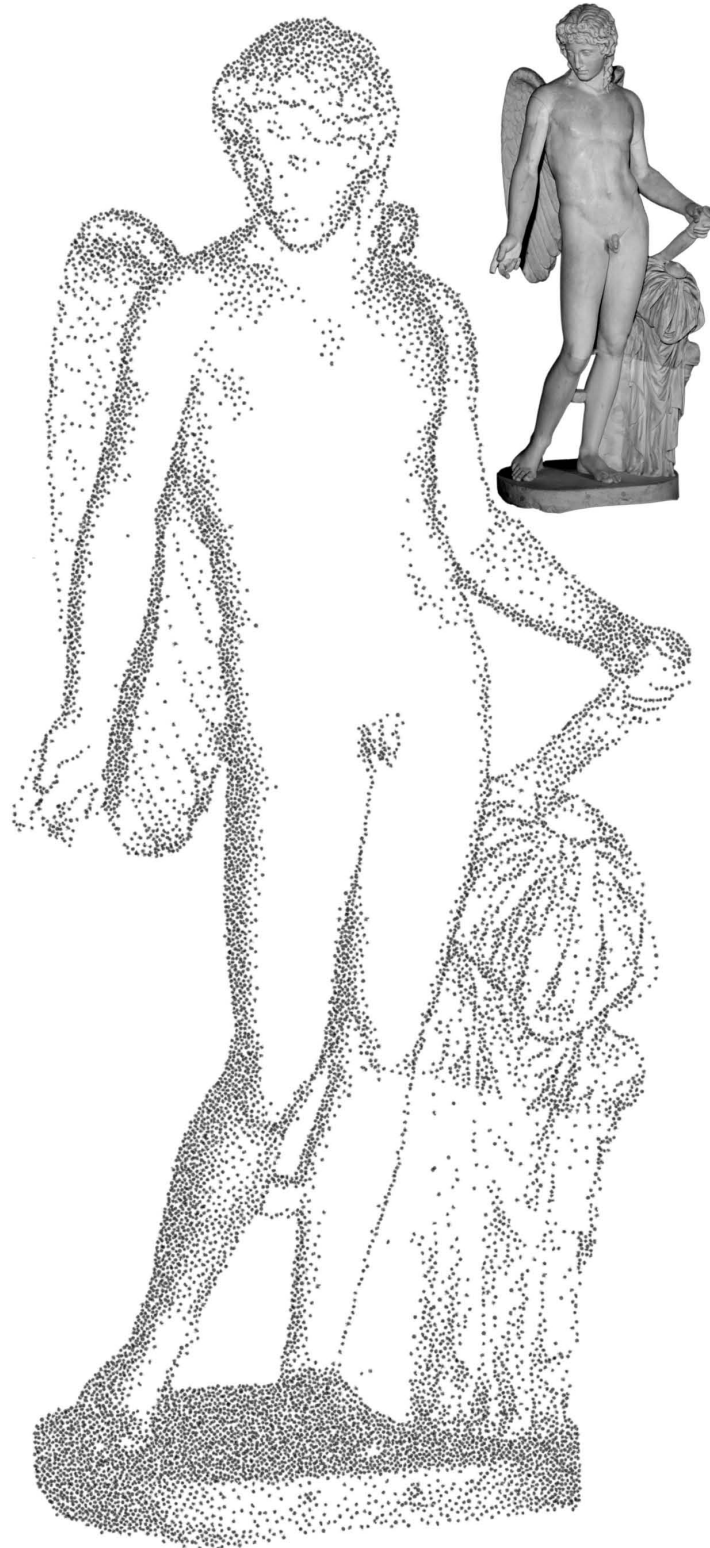


Figure 15: *Imagen de punteado obtenida por nuestro sistema con los puntos de tonalidad similar a la figura de nuestro artista.*

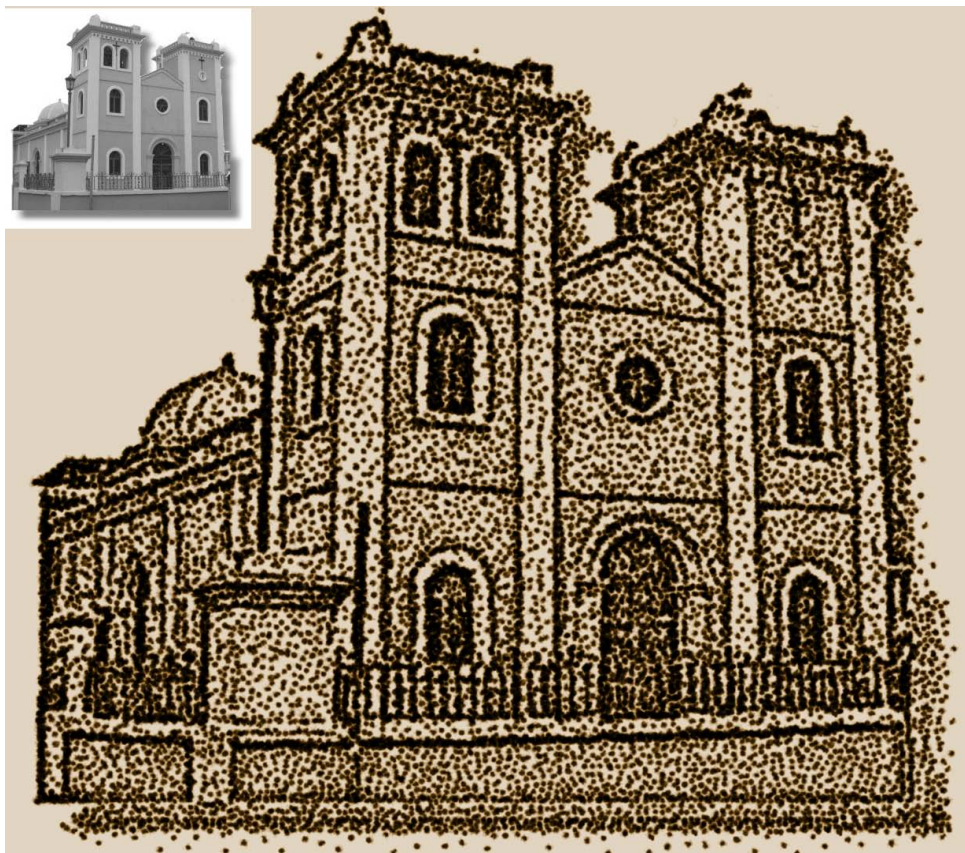


Figure 16: Imagen de punteado obtenida por nuestro sistema con los puntos de salida de color sepia.

- [Hod89] HODGES E. R. S.: *The Guild Handbook of Scientific Illustration*. John Wiley and Sons, 1989.
- [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.
- [KW03] KRÜGER J., WESTERMANN R.: Acceleration techniques for gpu-based volume rendering. In *Proceedings of Visualization 2003* (2003), IEEE Visualization.
- [LMT*03] LU A., MORRIS C., TAYLOR J., EBERT D., RHEINGANS P., HANSEN C., HARTNER M.: Illustrative interactive stipple rendering. In *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2003), vol. 9, pp. 127–138.
- [MIA*07] MACIEJEWSKI R., ISENBERG T., ANDREWS W. M., EBERT D. S., SOUSA M. C.: Aesthetics of hand-drawn vs. computer-generated stippling. In *Proceedings of Computational Aesthetics in Graphics* (2007), no. 3, p. unknown.
- [Mou07] MOULD D.: Stipple placement using distance in a weighted graph. In *Proceedings of Computational Aesthetics in Graphics* (2007), no. 3, p. unknown.
- [PFS04] PASTOR O. M., FREUDENBERG B., STROTHOTTE T.: Real-time animated stippling. In *Proceedings of NPAR 2004* (2004), vol. 23, pp. 62–68.
- [Sec02a] SECORD A.: Non-photorealistic animation and rendering. In *Proceedings of the 2nd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering* (2002), ACM Press, pp. 37–43.
- [Sec02b] SECORD A.: Weighted voronoi stippling. In *Proceedings of NPAR* (2002), ACM Press, pp. 37–43.
- [SFWS03] SOUSA M. C., FOSTER K., WYVILL B., SAMAVATI F.: Precise ink drawing of 3d models. In *EUROGRAPHICS'03* (2003), Brunet I. P., editors D. F., (Eds.), vol. 22.
- [SGS05] SCHLECHTWEIG S., GERMER T., STROTHOTTE T.: Renderbots: Multi agent systems for direct image generation. *Computer Graphics Forum* 24 (2005), 283–290.
- [SHS02] SECORD A., HEIDRICH W., STREIT L.: Fast primitive distribution for illustration. In *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering* (2002), pp. 215–226.
- [WBSS04] WANG Z., BOVIK A. C., SHEIKH H. R., SIMONCELLI E. P.: Image quality assessment: From error measurement to structural similarity. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* (2004).
- [Woo94] WOOD P.: *Scientific illustration, second edition*. Vand Nostrand Reinhold, 1994.