DEPARTAMENTO
DE COMPUTACION

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Trabajo Práctico II

Procesamiento de imágenes (SIMD)

Organización del Computador II

Primer Cuatrimestre de 2019

Integrante	LU	Correo electrónico
Ivo Pajor	460/19	ivo_pajor@hotmail.com
Luciana Gorosito	577/18	lugorosito0@gmail.com
Laureano Muñiz	498/19	lau2000m@hotmail.com

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Ciudad Universitaria - (Pabellón I/Planta Baja)

Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA

Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Rep. Argentina

Tel/Fax: (54 11) 4576-3359

http://www.fcen.uba.ar

Resumen

En el presente trabajo se describe la problemática de ...

Índice

1. Introducción

El objetivo de este Trabajo Práctico es analizar y comprender el modelo de procesamiento SIMD *(Single Instruction, Multiple Data)* y su relación con la microarquitectura del procesador, mediante la implementación en lenguaje ensamblador de cuatro filtros gráficos: «*Imagen Fantasma*», «*Color Bordes*» y «*Reforzar Brillo*».

Más detalladamente, el filtro «*Imagen Fantasma*» combina una imagen original con su versión en escala de grises y del doble de tamaño, generando así un efecto de imagen fantasma sobre la imagen destino. El filtro «*Color Bordes*» detecta los bordes de una imagen y el filtro «*Reforzar Brillo*» modifica el brillo de una imagen, aumentándolo en el caso de que supere al valor del parámetro *umbralSup* y disminuyéndolo en el caso de que esté por debajo del valor del parámetro *umbralInf*.

Las implementaciones de estos filtros se realizaron utilizando el set de instrucciones **SSE** y técnicas de programación vectorial, que permitieron procesar en paralelo de 2 a 4 píxeles, dependiendo del filtro. Posterior a la implementación se realizó un análisis de rendimiento en comparación a las implementaciones en lenguaje C, provistas por la cátedra. Además, se diseñaron dos experimentos motivados en entender las posibles causas de la variación del rendimiento y la limitación de la performance de los algoritmos en el procesamiento de imágenes, que serán detallados en las secciones siguientes.

2. Desarrrollo

2.1. Implementaciones en ASM

En esta sección se incluyen las descripciones de las funciones implementadas en lenguaje ensamblador.

2.1.1. Imagen Fantasma

En primer lugar, se definieron en la sección *section .data* los offset necesarios para obtener los parámetros que fueron pasados por la pila (offset_x y offset_y) y las máscaras a utilizar en la operatoria con los píxeles, estas son:

- *transparencia*: máscara utilizada para borrar la componente de transparencia del píxel, la misma fue luego restaurada al terminar el ciclo usando la máscara *sumar*.
- *green*: máscara utilizada para extraer la componente G del píxel, ya que es la única componente que duplica su valor al calcularse el brillo.
- *multiplicar*: máscara utilizada para multiplicar por 29, ya que $\frac{29}{32} \cong 0.9$, en la conversión a escala de grises.
- *sumar*: máscara utilizada para arreglar las transparencias de los píxeles al finalizar los cálculos.

  Previo al inicio del ciclo, se calculó el offset en bytes correspondiente al píxel de la posición (jj,ii) de la imagen Fuente, del cual se obtiene el brillo. La idea principal de este algoritmo es recorrer a la imagen en submatrices de 2x2, levantando de memoria en los registros *xmm1 y xmm2* los píxeles que les corresponde el mismo valor de brillo, para así poder procesarlos en paralelo.

  Más específicamente, en cada iteración del ciclo se realizaron los siguientes pasos:

  1. **Cálculo de brillo**
     Se levanta el píxel src[jj][ii] en el registro *xmm0*, extendiendo cada componente a dword, para poder realizar cálculos sin perder precisión. Además, como el cálculo del brillo solo necesita de las componentes RGB del píxel, antes de proceder se setea en cero a la componente A, aplicando la máscara de *transparencia* antes mencionada. Seguido a esto, se extrae en el registro *xmm13* la componente G del píxel, aplicando la máscara *green*. Se sumaron los registros *xmm0* y *xmm13*, y se realizaron dos sumas horizontales consecutivas del registro *xmm0*, obteniéndose en las cuatro *dwords* de este registro el resultado de la operación:

$$4B = src[jj][ii].r + 2 * src[jj][ii].g + src[jj][ii].b \tag{1}$$

Para finalizar el cálculo de brillo se transforman las *dwords* a *words* saturando de manera *unsigned*. Por último, resta dividir por 4 pero como en la conversión a escala de grises se utiliza el valor de $\frac{B}{2}$ se dividen por 8 las *words* del registro *xmm0* utilizando operaciones de shifteo hacia derecha.

2. **Conversión a escala de grises**

Se levantan los píxeles de la submatriz de 2x2 en los registros *xmm1 y xmm2*, extendiendo sin signo de *byte* a *word*. Se multiplican los valores de las componentes por 29 utilizando la máscara *multiplicar*. Luego, se shiftean las componentes hacia derecha 5 bits, lo cual equivale a dividir por 32 tomando piso. Por último, se suma *xmm0* a ambos registros de forma saturada para luego empaquetarlos de la misma manera de *words* a *bytes*.
Antes de cargar los resultados en la imagen Destino, se arreglan las transparencias de los píxeles con la mascara *sumar*.

2.1.2. Color Bordes

Se definieron en la sección *section .data* las siguientes máscaras:

- *blanco*: máscara utilizada para colorear de blanco los bordes de la imagen destino.
- *transparencias1*: máscara utilizada para restaurar la transparencia de un píxel.
- *transparencias2*: máscara utilizada para filtrar la componente de transparencia de un píxel.

y, antes de comenzar el ciclo, fueron guardadas en los registros *xmm15, xmm14 y xmm13*, respectivamente.

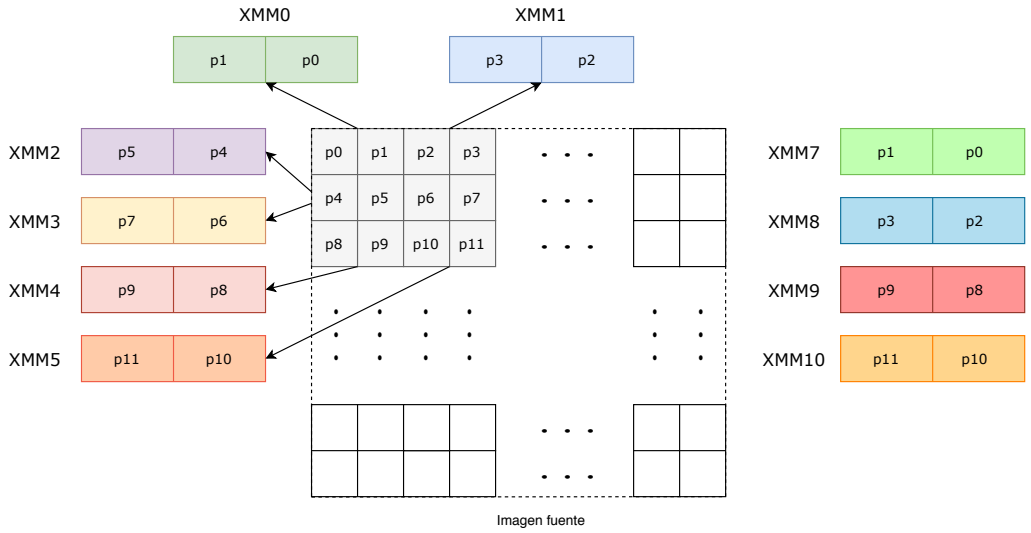
El algoritmo consta de dos ciclos cortos (*".bordesPrimeraFila"* y *".bordesUltimaFila"*) que arman los bordes blancos horizontales de la imagen destino, un *"preciclo"*, que actualiza las variables antes de ingresar a los otros dos ciclos (*".cicloFilas"* y *".cicloColumnas"*) que recorren la imagen Fuente realizando la operatoria de detección de bordes y armando los bordes verticales blancos de la imagen destino. A continuación se detallan las operaciones que se realizan en cada parte.

- **.bordesPrimeraFila**
  En cada iteración del ciclo se escriben 16 bytes de la imagen destino con el valor de 255(correspondiente al blanco), usando la máscara previamente guardada en el registro *xmm15*. Como se escriben cuatro píxeles de manera simultánea en cada iteración, el registro contador **edx** fue inicializado con el valor de $\#\frac{columnas}{4}$ y, para compensar el factor multiplicativo que le falta a la escala, el registro índice **r9d** fue incrementado en 2 unidades cada iteración.

- **.preciclo**
  Se guarda en **rdi** la dirección efectiva a la posición (1,1) de la imagen fuente y se guarda en **rsi** la dirección efectiva a la posición (1,0) de la imagen destino. Además, se decrementa el valor del registro contador de filas **ecx**, porque la primera fila ya fue pintada de blanco en el primer ciclo de bordes.

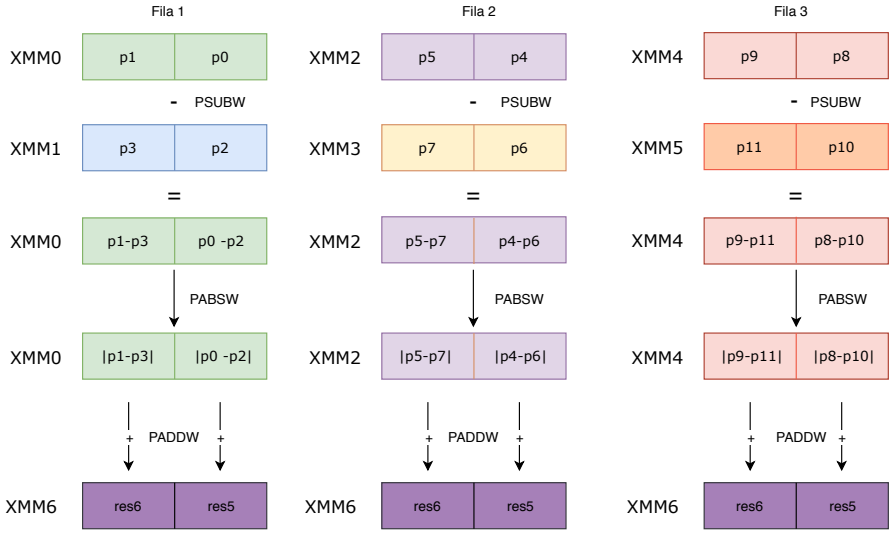
- **.cicloFila y .cicloColumnas**
  El ciclo externo (.cicloFilas) recorre a las imágenes fuente y destino por filas, empezando desde la primera. La guarda del ciclo compara a **edx** (registro contador de filas) con 1, por el margen de un píxel que debe dejarse y que es pintando de blanco en la imagen destino durante el último ciclo de bordes. Cada vez que se ingresa al ciclo de las filas, se pinta de blanco el primer píxel de la imagen destino y se avanza un píxel en la misma. De esta manera se va generando el margen vertical izquierdo esa imagen. Además, antes de ingresar al ciclo interno, se resetea el contador de columnas **eax**. El valor del contador es $\#\frac{columnas-2}{2}$, ya que los píxeles de la primera y última columna de la imagen fuente no se procesan y el resto de la operatoria se hace procesando de a 2 píxeles.
  En cada iteración del ciclo interno (.cicloColumnas) se levantan de memoria los seis píxeles necesarios para procesar los píxeles de la posición [rdi] y [rdi + 4]. Se levantan dos píxeles por registro,

extendiendo las componentes de cada píxel de byte a word, quedando así 2 píxeles por registro xmm. Se limpia el registro xmm6, que es usado como registro acumulador y se reservan en otros registros los píxeles necesarios para calcular las diferencias verticales.



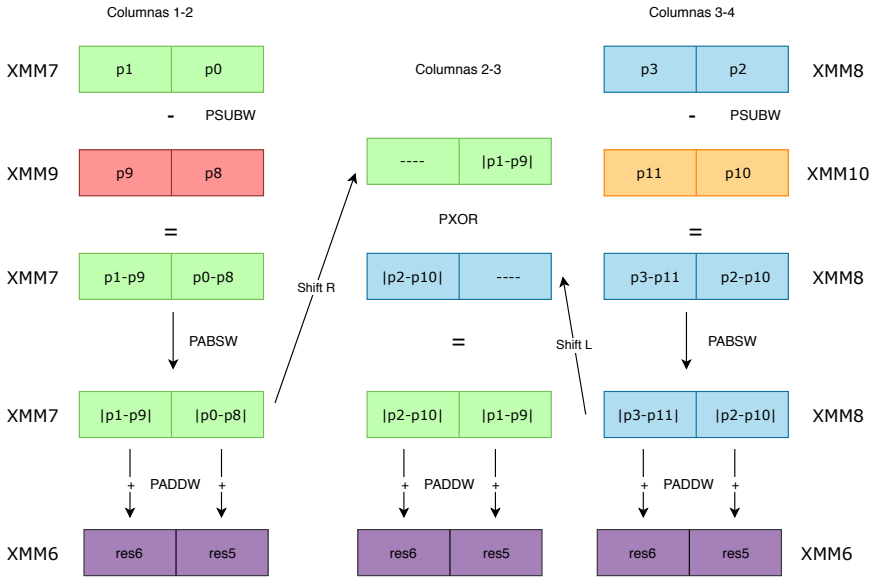
Obtención de datos de memoria

Para calcular las diferencias horizontales, se restan los registros correspondientes a una misma fila y luego se toma valor absoluto. El resultado de cada diferencia calculada se suma al registro xmm6, acumulándose en la parte alta la suma de diferencias horizontales para el píxel de la posición [rdi + 4] (píxel 6 en el ejemplo) y en la parte baja la suma de diferencias horizontales para el píxel de la posición [rdi] (p5 en el ejemplo).



Suma de diferencias horizontales

Para calcular las diferencias verticales, se restan los registros correspondientes al mismo par de columnas, se toma valor absoluto y se suman a xmm6. En este caso, las diferencias verticales de las columnas 2 y 3 deben ser sumadas tanto a la parte alta como a la parte baja del registro xmm6, por lo que es necesario reordenar los resultados para sumar los valores que faltan.
El siguiente esquema muestra gráficamente la operatoria realizada para obtener las sumas de las diferencias verticales:



Luego de acumular en xmm6 las sumas de las diferencias horizontales y verticales, se empaqueta el registro para convertir devuelta a byte y se arreglan las transparencias usando las máscaras destinadas a esto. Hecho esto, se mueven los resultados de los dos píxeles procesados a la imagen destino y se actualizan los índices sumando 8 bytes a rdi y a rsi.

Antes de avanzar de fila, se pinta de blanco el último píxel de la matriz destino, de esta manera se arma el margen vertical derecho de la imagen destino.

- **.bordesUltimaFila**
  Este ciclo realiza la misma operatoria que .bordesPrimeraFila, pero usa como registro contador a **r10d** y como registro índice a **edx**, que terminó con el valor 0 luego del primer ciclo bordes.

2.1.3. Reforzar Brillo

Nuevamente se definieron en primer lugar las máscaras a utilizar en la operatoria con los píxeles, estas son:

- *transparencia*: máscara utilizada para borrar la componente de transparencia del píxel, la misma fue luego arreglada al terminar el ciclo usando la máscara *fix*.
- *green*: máscara utilizada para extraer la componente G del píxel, ya que es la única componente que duplica su valor al calcularse el brillo.
- *fix*: máscara utilizada para fijar el valor de las transparencias de los píxeles al valor de 255.

Previo a comenzar el ciclo, dichas máscaras fueron guardadas en los registros *xmm15, xmm14 y xmm9*, respectivamente. Además se guardaron el UmbralSup, el UmbralInf, el BrilloSup y el BrilloInf en los registros *xmm13, xmm12, xmm11 y xmm10*. Se realizó el broadcasting necesario en dichos registros y, en el caso de los brillos, se empaquetaron en 8 bits teniendo en cuenta que si el valor era mayor a 255 debía saturarse a ese valor.

La idea principal de este algoritmo es recorrer la imagen levantando de memoria 4 píxeles consecutivos en el registro *xmm4* y utilizando registros auxiliares calcular el brillo de cada píxel y determinar a cuales píxeles se les debe sumar brillo.

Más específicamente, en cada iteración del ciclo se realizaron los siguientes pasos:

1. **Cálculo de brillo**
   Una vez levantados los 4 píxeles en el registro *xmm4* se elimina la transparencia de estos píxeles usadando la mencionada máscara *transparencia* puesto que el componente A no es necesario en el

cálculo de brillo. Para efectuar los cálculos propicios se realiza una copia de los valores de *xmm4* en *xmm3*. Posteriormente, se extraen al registro *xmm2* los componentes G de cada píxel utilizando la mascara *green* y se eliminan los componentes G del registro *xmm3*. Para poder realizar el cálculo de brillo correctamente es necesario extender los componentes R, G y B de *byte* a *word* puesto que al realizar las operaciones requeridas los valores resultantes podrían excederse del rango numérico propio del *byte*. Por este motivo los componentes G del *xmm2* son primeramente alineados a *word* y luego multiplicados por 2. Por otro lado, los componentes R y G que se encuentran aún en *xmm3* están alineados ya a *word* por lo que se procede a realizar la suma horizontal de estos dos con el formato de 16 *bits*. Por una cuestión de conveniencia, se desempaquetan las sumas de los componentes R y B de los 4 píxeles que se encuentran en la parte baja de *xmm3* transformándolas de *word* a *dword*. Gracias a que los valores de 2*G en *xmm2* están alineados a *dword* se procede a sumar los valores correspondientes a cada píxel en el formato de 32 *bits*. De esta manera se obtiene en el registro *xmm3* los brillos correspondientes a cada pixel pero multiplicados por 4. Simplemente shifteando a derecha dos veces cada *dword* se obtienen finalmente los 4 brillos definidos en la operación:

$$B = (src[i][j].r + 2 * src[i][j].g + src[i][j].b)/4 \quad (2)$$

2. **Adición de brillo superior**

   Una vez calculados los 4 brillos se transfieren al registro *xmm6*, donde luego son comparados uno a uno con los valores de umbral superior, guardados en *xmm13*. En caso de que un brillo sea mayor al umbral superior, se guarda en *xmm6* en los 32 *bits* correspondientes una máscara con 1s. Caso contrario se guarda en esa posición una máscara con 0s. Con ayuda de estas máscaras y utilizando los valores guardados en *xmm11* se colocan en *xmm6* 4 brillos superiores en los 32 *bits* donde correspondan. Finalmente se suman *byte* a *byte* los registros *xmm4* y *xmm6*.

3. **Adición de brillo inferior**

   Para realizar la adición del brillo inferior, se transfieren ahora a *xmm6* los umbrales inferiores guardados en *xmm12* para que luego sean comparados uno a uno con los brillos de cada píxel. De manera análoga a la anterior, en caso de que un umbral inferior sea mayor al brillo se guarda en esa posición una máscara con 1s, y en el caso contrario con 0s. Nuevamente con ayuda de estas máscaras y ahora utilizando los valores de brillo inferior guardados en *xmm13* se colocan en *xmm6* 4 brillos inferiores en los 32 *bits* donde correspondan. Luego se restan *byte* a *byte* los registros *xmm4* y *xmm6*.

   En último lugar se arreglan las transparencias de los píxeles con la máscara *fix* y se cargan los 4 pixeles a la imagen Destino.

2.2. Comparación entre implementaciones en ASM y C

El propósito de esta sección es comparar cada una de las implementaciones de los filtros codificadas en lenguaje ensamblador contra las implementaciones en C, provistas por la cátedra. La comparación realizada está centrada en el rendimiento de las implementaciones en ambos lenguajes y, para el caso de C, el rendimiento en función de las distintas opciones de optimización del código.

La forma de medir el rendimiento se realizó mediante la toma de tiempos de ejecución, utilizando el *Time Stamp Counter (TSC)*, registro del procesador que cuenta el número de ciclos del mismo y permite así calcular la cantidad de ciclos de ejecución de un filtro, a partir de la diferencia entre los contadores previos y posteriores a la llamada de la función del mismo.

Dado que el registro TSC se ve afectado por diversos factores (*scheduling*, estado del procesador, etc), el tiempo de ejecución medido no siempre es el mismo, ni es exacto, por lo que fue necesario definir un protocolo de toma de mediciones, con el objetivo de reducir el *ruido* que producen esos factores en la medición y poder obtener una muestra representativa del tiempo de ejecución. El mismo consistió en

reducir al mínimo la cantidad de programas ejecutándose al momento de tomar las mediciones, y tomar muestras con gran cantidad de datos (200 repeticiones), a las que luego se les eliminaron los *outliers*.

Metodología

Las mediciones fueron tomadas en una computadora con las siguientes especificaciones:

Se tomaron 5 muestras de 200 datos para cada filtro (Imagen Fantasma, Color Bordes y Reforzar Brillo), correspondientes a la implementación en ASM y a la implementación en C compilada bajo los siguientes casos:

1. Caso 1: Implementación en C usando la optimización del compilador **-o0**.
2. Caso 1: Implementación en C usando la optimización del compilador **-o1**.
3. Caso 1: Implementación en C usando la optimización del compilador **-o2**.
4. Caso 1: Implementación en C usando la optimización del compilador **-o3**.

Para eliminar los *outliers*, a cada muestra se le calculó su media alfa-podada a ambos extremos, eliminando 10 valores. De esta manera se obtuvieron muestras más representativas del ”valor real”del tiempo de ejecución de cada implementación.

Se calculó el desvío estándar de cada muestra, para obtener un valor que sirva para comparar la dispersión de los datos.

Finalmente, partir de las mediciones se confeccionaron gráficos para condensar la información obtenida en la toma de datos.

Resultados

2.3. Diseño experimental

3. Resultados

4. Conclusión