

Organización del Computador II

Trabajo Práctico 2

Emilio Almansi
ealmansi@gmail.com

Miguel Duarte
miguel feliped@gmail.com

Federico Suárez
elgeniofederico@gmail.com

2^{do} cuatrimestre de 2013

Resumen

En este documento se analiza las diferencias en rendimiento encontradas para las implementaciones de algunos filtros de imágenes al utilizar instrucciones SIMD de la arquitectura Intel 64.

Índice

1. Introducción	2
2. Consideraciones generales	3
3. Filtro de color	4
3.1. Descripción del filtro	4
3.2. Implementación en lenguaje C y lenguaje ensamblador	4
3.3. Optimizaciones en código C	5
3.4. Optimización en código ASM - Desenrollado de ciclos	6
4. Filtro Miniature	7
4.1. Descripción del filtro	7
4.2. Implementación en lenguaje C y lenguaje ensamblador	7
5. Decodificación esteganográfica	8
5.1. Descripción del filtro	8
5.2. Implementaciones	8
5.3. Optimizaciones	8
6. Conclusiones	9

1. Introducción

A lo largo de este documento se realizará un análisis consiso sobre el procesamiento de datos SIMD mediante las intrucciones SSE de la arquitectura AMD-64. El mismo se hará mediante la comparación de diversas implementaciones de 3 filtros (2 de video y uno de imagen).

El procesamiento SIMD consiste en realizar una misma operación sobre varios datos de manera simultánea. Es decir que lo que se logra es paralelismo a nivel de datos. Esta clase procesamiento es ideal para realizar filtros sobre imágenes , porque ahí justamente lo que uno busca es que cada pixel reciba el mismo proceso.

Sin embargo para realizar este análisis es imperioso meterse un poco mas adentro. El comportamiento esperado a priori para estos procesos es una relación inversa entre el nivel de paralelismo y el tiempo consumido. Es decir, al procesar 4 datos a la vez uno esperaría obtener que el proceso tarde 4 veces menos tiempo, procesando 8 datos a la vez 8 veces menos tiempo, etc. Sin embargo esto no siempre ocurre. Durante este trabajo constantemente se va a intentar explicar que desviaciones se produjeron con respecto a este supuesto. Para eso vamos a analizar la arquitectura intel-64, la velocidad de acceso a memoria, el modo en que se usa la caché, el medio en el cuál se ejecutan los programas y los algoritmos utilizados entre otras cosas.

A lo largo del trabajo se va a ir mostrando como el uso de código de ensamblador optimizado para el uso de la tecnología SSE produce programas sumamente eficientes. Sin embargo producir ese código es sumamente trabajoso, mucho mas que usar lenguajes de mas alto nivel como c o c++. Por ese motivo se intentará hacer otro análisis (tal vez algo menos científico pero intentando justificar de la manera mas objetiva posible) de cuando vale la pena y cuando no.

2. Consideraciones generales

Método de trabajo

A la hora de implementar los filtros se tuvieron algunas consideraciones generales para poder explicar los resultados de manera correcta, para mantener la coherencia interna dentro del trabajo y para tener bases firmes en las que basarnos para sacar conclusiones. Siguiendo esta idea todo lo implementado sigue los siguientes criterios:

- Todas las implementaciones de C intentan ser lo mas intuitivas posibles. No se utilizaron optimizaciones demasiado extrañas. Intentan ser una traducción bastante fiel de la descripción en lenguaje natural del enunciado a C. Decimos esto para poder analizar de manera pura la diferencia entre los dos paradigmas. Además a la hora de analizar los archivos objeto creados por los compiladores tener un algoritmo simple ayuda a hacer un análisis mas simple y consistente. Por otra parte da libertad al compilador para meter tanta paralelización como pueda de tal manera que los diferentes compiladores puedan introducir ellos las optimizaciones en lugar de respetar un esquema previo.
- Todas las implementaciones en asm se escribieron intentando minimizar al máximo los accesos a memoria. Una vez dentro del ciclo sólo se accede a memoria para buscar datos y para escribir datos. La razón de esto es que los accesos a memoria son lentos, por lo que en general cuando se busca performance es buena idea evitarlos. Sin embargo en cada implementación se va a analizar si esto fue una decisión acertada o no.
- Todos los códigos de C se compilaron con 2 compiladores distintos:
 - GNU C Compiler (GCC): Se eligió por ser un compilador libre, conocido, popular , sumamente versatil y porque es capaz de realizar una gran gama de optimizaciones, probablemente todas aquellas que se pueden realizar sin acceder al micro código de intel.
 - Intel C++ Studio XE (ICC): Este compilador introduce de manera predeterminada código que aprovecha la tecnología SSE. Es decir que de manera predeterminada genera código objeto que realiza paralelismo a nivel de datos. Además realiza optimizaciones de altísima calidad aprovechando los detalles del micro-código.

Además si bien siempre se compiló indicándole al compilador que use instrucciones SSE4.3 además se hicieron 2 versiones distintas con cada compilador: Una con optimizaciones agresivas y otra sin ellas. Para la primera usó el flag -O3, mientras que para la segunda se dejó el comportamiento predeterminado.

Método de testeo y medición

A la hora de realizar las mediciones de tiempo se intentó armar el ambiente mas ameno posible. Para esto antes de realizar los tests se mataron todas las aplicaciones no vitales para el sistema operativo, incluida la interfaz gráfica, acceso a internet y toda esa clase de cosas (init 1, kill -9 -1). Además se desconectaron todos los periféricos innecesarios.

Las mediciones se repitieron entre 50 y 100 veces (según el filtro). Estos números se decidieron en base a prueba y error. Eliminando los valores atípicos de esa cantidad de valores hacia arriba la variación de la media era despreciable (menor al 0.5)

Para eliminar los valores atípicos se utilizó el procedimiento de rango intercuartil. Es decir que se eliminaron aquellos elementos que estuvieran en los dos cuartiles externos.

—Dibujito cuartiles—

Con el resto de los valores se realizó un promedio. Es muy importante notar que una vez eliminados los valores atípicos la variación resulta realmente baja. En general de menos del 2 con la media, que es una referencia muy fuerte, y además estar muy cerca del mínimo valor obtenido.

3. Filtro de color

3.1. Descripción del filtro

El filtro de color es una transformación sobre imágenes a color que tiene el efecto de decolorizar o pasar a escala de grises todos los píxeles de la entrada cuyo color no esté dentro de un rango de colores especificado. En la figura 1 se observa un ejemplo de funcionamiento típico.



Figura 1: Imagen antes y después de aplicar el filtro de color con color principal rojo.

La forma en la cual se especifica el rango de colores que deberá permanecer inmutado es mediante la elección de un color principal, cuya codificación RGB se denota con (rc, gc, bc) , y un parámetro umbral $threshold$. Una vez determinados estos valores, un píxel de la imagen fuente será actualizado por el filtro únicamente si cumple:

$$\|(r, g, b) - (rc, gc, bc)\|_2 > threshold \quad (1)$$

donde (r, g, b) es la codificación en RGB del píxel. En particular, de cumplirse esta condición, los tres canales se actualizan de la siguiente forma:

$$r' = g' = b' = \frac{r + g + b}{3}$$

De esta última expresión se desprende que el color de los píxeles alterados pasa a estar en la escala de grises, ya que los tres canales toman igual valor. Como una observación adicional, queda claro mediante esta especificación que el filtro actúa de forma localizada en sobre cada píxel; su susceptibilidad a ser modificado y su nuevo valor dependen únicamente de su propio valor, y no del de sus vecinos.

3.2. Implementación en lenguaje C y lenguaje ensamblador

La implementación en C del filtro se realizó de la forma más sencilla e intuitiva posible; mediante un ciclo que visita una vez a cada píxel de la imagen, de izquierda a derecha y de arriba a abajo, evaluando la condición y modificando su valor de ser necesario. Como única optimización elemental, se modificó la condición (1) por la siguiente condición equivalente:

$$\|(r, g, b) - (rc, gc, bc)\|_2^2 = (r - rc)^2 + (g - gc)^2 + (b - bc)^2 > threshold^2$$

La modificación evita el cálculo de una raíz cuadrada, sin incurrir en el riesgo de exceder el rango del tipo de datos utilizado ya que el máximo $threshold$ que no hace a la condición trivialmente falsa es $\sqrt{195075} \approx 441$ (el valor máximo que puede tomar la expresión de la izquierda es $255^2 + 255^2 + 255^2 = 195075$), por lo que cualquier valor mayor se puede reducir a 442.

La implementación en lenguaje ensamblador mantiene esencialmente el mismo procedimiento, con la salvedad de que fue adaptado para procesar cuatro píxeles en simultáneo mediante el uso de operaciones SIMD. Se recorre la matriz en el mismo orden descrito previamente, realizando lecturas de 16 bytes por iteración (equivalente a 5 píxeles y un byte sobrante).

La necesidad de limitar el procesamiento simultáneo a cuatro píxeles se desprende del hecho de que, como se dijo antes, la expresión que mide la distancia entre un píxel y el color principal puede tomar valores en el rango

0, ... 195075. Este último valor no cabe en un entero de 16 bits, precisándose un **double word** para almacenar ese resultado temporal; esto implica un total de hasta cuatro valores de distancia en un registro XMM. Por esta razón, además sería similar trabajar con el tipo de datos **float** ya que también caben hasta cuatro por registro de 128 bits.

De esta forma, el procedimiento realizado en cada iteración consiste en (para cada uno de los cuatro píxeles en simultáneo) comparar el valor de la distancia con el *threshold*, y calcular el promedio de los tres canales, actualizando luego sus valores según la siguiente expresión informal:

$$\text{valor_original} \wedge \neg \text{cumple_condicion} + \text{promedio} \wedge \text{cumple_condicion}$$

Esto permite expresar el equivalente a una expresión del tipo **if-then-else**, en el lenguaje del procesamiento simultáneo. El cómputo de los flags con el resultado de las comparaciones y del promedio se puede describir mediante el pseudo-código de la figura 2.

```

prom := [0,0,0,0]                                // enteros doubleword
dist := [0,0,0,0]

desempaquetar el rojo de cada pixel a un double word
rojos := [r4, r3, r2, r1]

prom += rojos
rojos -= [rc, rc, rc, rc]
rojos *= rojos
dist += rojos

repetir para verdes
repetir para azules

prom := prom / 3
dist := dist > [threshold, threshold, threshold, threshold]
empaquetar prom y dist a formato pixeles

resultado := datos AND NOT dist
resultado += prom AND dist

```

Figura 2: Pseudo-código de la implementación en lenguaje ensamblador del filtro color.

Para simplificar la implementación, se asumió que la imagen tiene una cantidad de píxeles *múltiplo de 4* (*ancho * altura = 4 * k*); de esta forma, si en cada iteración se procesan 4 píxeles, no es necesario realizar una adaptación en función del tamaño de la imagen. Esta decisión es razonable porque si se admitieran imágenes sin esta característica, habría que procesar solamente 1, 2 o 3 píxeles fuera del ciclo principal, sin alterar significativamente la performance del filtro.

Sin embargo, incluso para una cantidad de píxeles múltiplo de 4, es importante contemplar el *caso borde* que sucede en la última iteración, cuando faltan procesar los últimos cuatro píxeles de la imagen. De realizarse una lectura desde el comienzo del píxel, se leería junto a los píxeles restantes un total de 4 bytes de memoria posteriores al fin de la imagen. Por esta razón, la última iteración se dejó fuera del ciclo principal, realizando un retroceso de 4 bytes en el puntero de lectura, y ejecutando una versión levemente modificada del cuerpo de ciclo de forma tal que procese los píxeles en los últimos 12 bytes del registro, en vez de los primeros.

3.3. Optimizaciones en código C

El código de la implementación en lenguaje C se compiló con los distintos flags de optimización descriptos en la sección ???. Los resultados en cuestión de performance se pueden ver en la figura ??, la cual muestra una comparación entre la cantidad de clocks consumidos durante la ejecución de cada versión.

TODO:: Discutir un poco la figura.

Adicionalmente, se analizaron las diferencias entre el código generado con compilación estándar y el código generado con optimización de tipo O1. La diferencia entre ambos evidencia inmediatamente una característica subóptima del código estándar; *todas* las variables locales se alojan en la pila, incluso habiendo disponibilidad de registros. Los registros se utilizan únicamente como variables temporales, y al final de cada extracto de código se guarda el resultado

en un espacio de la pila. El código generado con O1, en cambio, ahorra gran cantidad de esos accesos a memoria. Este comportamiento se ejemplifica con el siguiente extracto (figura 3).

mov eax, DWORD PTR[rbp-0x10]		imul r15d, r15d
mov edx, eax		imul r14d, r14d
imul edx, DWORD PTR[rbp-0x10]		add r14d, r15d
mov eax, DWORD PTR[rbp-0xc]		imul ebx, ebx
imul eax, DWORD PTR[rbp-0xc]		add ebx, r14d
add edx, eax		
mov eax, DWORD PTR[rbp-0x8]		
imul eax, DWORD PTR[rbp-0x8]		
add eax, edx		
mov DWORD PTR [rbp-0x4], eax		

Figura 3: Código objeto generado con compilación por default (izquierda), y con optimización de tipo O1 (derecha).

Sin embargo, la lógica de flujo del código generado es equivalente. Es decir, las operaciones realizadas y el orden en que se realizan son iguales; se mantiene la forma de recorrer la imagen y el procesamiento píxel por píxel.

3.4. Optimización en código ASM - Desenrollado de ciclos

Sobre la implementación en lenguaje ensamblador ya descrita, se realizaron dos sucesivas modificaciones para estudiar la técnica conocida como desenrollado de ciclos.

4. Filtro Miniature

4.1. Descripción del filtro

El filtro miniature es un caso particular de la familia de filtros por convolución, en los cuales se procesa una imagen realizando una convolución entre esta y una matriz determinada denominada *kernel*. Las características del *kernel* determinan el efecto resultante sobre la matriz; en este caso, el efecto logrado se conoce como desfoque gaussiano (se puede ver un ejemplo en la figura ??), y se obtiene mediante el siguiente *kernel*:

$$\frac{1}{600} * \begin{pmatrix} 1 & 5 & 18 & 5 & 1 \\ 5 & 32 & 64 & 32 & 5 \\ 18 & 64 & 100 & 64 & 18 \\ 5 & 32 & 64 & 32 & 5 \\ 1 & 5 & 18 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Operativamente, la imagen es procesada mediante una actualización píxel a píxel, reemplazando el valor de cada canal de color del píxel por una combinación lineal del valor de sus vecinos, cada uno ponderado por un coeficiente determinado por un elemento de la matriz. Se toma el elemento central del *kernel* como coeficiente del píxel que se está procesando, y la posición relativa a los demás elementos de la matriz determina a cuál vecino corresponde en la combinación lineal. El factor $\frac{1}{600}$ es una constante de normalización que garantiza que el resultado sea un valor en el rango $[0, 255]$.



Figura 4: Imagen antes y después de aplicar el filtro miniature con parámetros de banda 0,08 y 0,25, y un total de 20 iteraciones.

Se incorpora una leve modificación al modelo típico de filtro por convolución, limitando el efecto del filtrado a dos bandas dentro de la imagen; una banda superior, y una banda inferior, dejando la banda central de la imagen inalterada. Se especifican dos parámetros $0 < topPlane < bottomPlane < 1$, de forma tal que las bandas quedan determinadas de esta forma:

banda superior: filas $0 \dots topPlane * altura$
banda media: filas $topPlane * altura + 1 \dots bottomPlane * altura - 1$
banda baja: filas $bottomPlane * altura \dots altura - 1$

Adicionalmente, se realizan múltiples iteraciones de filtrado, reduciendo el ancho de cada banda luego de cada iteración por:

Δ **banda superior:** $topPlane * altura / cantIteraciones$
 Δ **banda baja:** $(1 - bottomPlane) * altura / cantIteraciones$

En el caso de los píxeles del borde, donde no existe el vecindario completo, se optó por exceptuarlos del filtrado, simplificando el procedimiento al saltar las dos primeras y dos últimas filas y columnas.

4.2. Implementación en lenguaje C y lenguaje ensamblador

El filtro se implementó en C mediante un ciclo que visita una vez por iteración a cada píxel de la banda superior y de la banda inferior, y actualizando el valor de sus tres canales de color por la combinación lineal descripta previamente.

Para este filtro, la implementación intuitiva en C resultó particularmente sugerente a la necesidad de buscar formas de optimizar el procedimiento, dado que cada píxel se lee de la memoria hasta 25 veces (una vez por cada vecino) resultando en un tiempo de ejecución prolongado; y además, el tipo de procesamiento realizado por cada píxel es el cómputo de una combinación lineal, para lo cual los procesadores están altamente optimizados, desperdiciando los beneficios del hardware.

5. Decodificación esteganográfica

5.1. Descripción del filtro

El filtro consiste en extraer un mensaje codificado dentro de la imagen conociendo, por supuesto la manera en que este está codificado.

La codificación consiste en cambiar en cada byte de la imagen los dos bits menos significativos por los bits del mensaje. Es decir que cada byte del mensaje se codifica en 4 bytes de la imagen (2 bits en cada imagen).

Es decir que la imagen está alterada, pero los cambios son tan leves que no son visibles al ojo humano. Es mucho mayor la variación de colores que se produce por ver la imagen en diferentes monitores que la que se produce por cambiar estos bits.

Los pares de bits, además tienen una breve codificación individual. Que se determina mirando los bits 2 y 3 de cada Byte. Es decir que uno sabe como interpretar los dos bits menos significativos mirando los siguientes 2 bits.

5.2. Implementaciones

Para decodificar se usaron 3 implementaciones: Una escrita en lenguaje C. Una escrita en lenguaje ensamblador y otra escrita en lenguaje ensamblador intentando usar la máxima los beneficios de la técnica de software pipelining.

El algoritmo de C al igual que en los otros filtros es lo más intuitivo posible. Básicamente se lee de a un byte de la imagen. Mediante máscaras se filtran los dos bits menos significativos y los siguientes 2 bits menos significativos.

Los bits 2 y 3 se comparan en un switch para saber como procesar a los bits 0 y 1. Una vez que se procesaron los bits 0 y 1 se los guarda se los mueve a izquierda la cantidad de lugares adecuada (0, 2, 4 o 6) según sea el primer par de bits de ese bytes, el segundo, el tercero o el cuarto. Luego se van acumulando esos resultados parciales y cuando se tiene un byte entero se lo guarda en el vector destino.

Cabe aclarar que a la hora de implementar en ensamblador este filtro provee bastantes facilidades. Todos los corrimientos que hay que hacer son múltiplos de dos y la cantidad de datos que hacen falta decodificar para formar un byte es potencia de 2. Estas cosas facilitaron mucho el trabajo. Además en ningún momento se necesita saber la posición de los píxeles ni nada por el estilo, por lo que la matriz fuente se puede tomar sencillamente como un gran vector.

El proceso, entonces, es sencillo:

1. Se traen datos de la matriz fuente a un registro xmm. Una vez que están en registro estos datos se copian a otro xmm
2. En una de las copias se conservan los bits 0 y 1. En otra los bits 0 y 3.
3. A todos los bits se los hace pasar por el proceso de sumar, restar y negar. Sin embargo lo que se hace es usar una máscara para poner diferentes operandos en cada uno. Por ejemplo cuando se realiza la suma sólo aquellos valores a los que corresponde sumar tienen como segundo operando un uno, el resto tiene un cero. Para que esto quede así se repiten los siguientes pasos para cada posición de operación:
 - a) Se compara el registro que tiene los bits 2 y 3 con una máscara que contiene la referencia a la operación a realizar repetida en cada byte. Por ejemplo la máscara de negar tiene 0x0C en todos sus bytes.
 - b) Cada vez que se compara con una máscara luego se realiza una conjunción con otra máscara que tiene el segundo operando de la operación a realizar. Por ejemplo si lo que hay que hacer es la dato sumarle uno entonces se usa una máscara de unos. En el resto de las posiciones queda cero.
 - c) Por último se realiza la operación entre los datos (es decir los bits menos significativos de los bytes traídos de la imagen) y la máscara recién creada.
4. Una vez realizado 4 cuartetos de pares de bits alineados. Para que ocupen las posiciones adecuadas, entonces, lo que se hace es realizar 4 copias, shiftear de manera empaquetada, 0, 2, 4 y 6 lugares respectivamente y por último sumar todo.
5. Ahora se tienen 4 bytes armados pero desordenados. Es necesario tenerlos todos en la parte baja del registro para poder grabar a memoria. Esto se hace mediante un shuffle de bytes.
6. Al final del ciclo existe un caso complicado. El tamaño del string de salida no tiene por qué ser múltiplo de 4 (hasta ahora se estuvieron insertando de a 4 bytes a la vez). Para resolver esto se implementó una lógica especial intentando que reste la menor cantidad de performance posible. Sólo se entra al código que describe esta lógica en la anteúltima y en la última iteración.

5.3. Optimizaciones

Se intentó utilizar el entubado de código (*softwarepipelining*) de diversas maneras. En un principio se dividió el proceso en 4 etapas: Acceso a memoria por un lado y por otro los 3 entradas del switch. Sin embargo esto no produjo mejoras en la performance, por el contrario disminuyó. Por lo tanto se bajó un poco el nivel de ambición y se realizaron sólo 2 etapas. Por un lado el acceso a memoria y por el otro lado el proceso de los datos. La idea era lograr que el proceso siga mientras se realiza el acceso a memoria en lugar de tener que esperar. El proceso fue el siguiente:

Antes de entrar al ciclo se traen los datos necesarios para hacer la primera iteración. Una vez adentro del ciclo se traen los datos necesarios para la segunda iteración, pero se trabaja con los datos que ya se trajeron antes. Luego al finalizar el ciclo. Se mueven los datos traídos al principio del ciclo al registro en el cuál se trabaja.

El resultado de esto es que las operaciones no tienen dependencias a nivel de datos con la lectura de memoria, por lo tanto el procesador no tienen que esperar a que se termine el ciclo de lectura para poder empezar a trabajar con los datos.

A nivel de código la optimización es súper sencilla. Mucho mucho más que la anterior. Bastó con agregar unas pocas líneas de código en el lugar adecuado para aumentar en un 15 % la performance con respecto al código original. Un par de pruebas nos mostraron que el lugar óptimo para hacer el último movimiento es lo mas cerca del final del ciclo posible.

5.4. Rendimiento

—Insertar gráfico—

6. Conclusiones