

2º curso / 2º cuatr.

Grado en
Ing. Informática

Arquitectura de Computadores. Ejercicios y Cuestiones

Tema 4. Arquitecturas con Paralelismo a nivel de Instrucción (ILP)

Material elaborado por los profesores responsables de la asignatura:
Julio Ortega, Mancia Anguita

1 Ejercicios

Ejercicio 1. Para el fragmento de código siguiente:

```
1.  lw   r1, 0x1ac      ; r1 ← M(0x1ac)
2.  lw   r2, 0xc1f      ; r2 ← M(0xc1f)
3.  add  r3, r0, r0      ; r3 ← r0+r0
4.  mul  r4, r2, r1      ; r4 ← r2*r1
5.  add  r3, r3, r4      ; r3 ← r3+r4
6.  add  r5, r0, 0x1ac   ; r5 ← r0+0x1ac
7.  add  r6, r0, 0xc1f   ; r6 ← r0+0xc1f
8.  sub  r5, r5, #4      ; r5 ← r5 - 4
9.  sub  r6, r6, #4      ; r6 ← r6 - 4
10. sw   (r5), r3        ; M(r5) ← r3
11. sw   (r6), r4        ; M(r6) ← r4
```

y suponiendo que se pueden captar, decodificar, y emitir cuatro instrucciones por ciclo, indique el orden en que se emitirán las instrucciones para cada uno de los siguientes casos:

- Una ventana de instrucciones centralizada con emisión ordenada
- Una ventana de instrucciones centralizada con emisión desordenada
- Una estación de reserva de tres líneas para cada unidad funcional, con envío ordenado.

Nota: considere que hay una unidad funcional para la carga (2 ciclos), otra para el almacenamiento (1 ciclo), tres para la suma/resta (1 ciclo), y una para la multiplicación (4 ciclos). También puede considerar que, en la práctica, no hay límite para el número de instrucciones que pueden almacenarse en la ventana de instrucciones o en el buffer de instrucciones.

Solución

A continuación se muestran la evolución temporal de las instrucciones en sus distintas etapas para cada una de las alternativas que se piden. En esas figuras se supone que tras la decodificación de una instrucción, ésta puede pasar a ejecutarse sin consumir ciclos de emisión si los operandos y la unidad funcional que necesita están disponibles. Por esta razón, no se indicarán explícitamente los ciclos dedicados a la emisión en los casos (a) y (b), y al envío en el caso (c)

a) Emisión ordenada con ventana centralizada

Como se muestra la tabla correspondiente, las instrucciones se empiezan a ejecutar en orden respetando las dependencias de datos o estructurales que existan. Por ejemplo la segunda instrucción de acceso a memoria `lw` debe esperar que termine la instrucción `lw` anterior porque solo hay una unidad de carga de memoria. La emisión de la instrucción `add r3, r3, r4` debe esperar a que termine la ejecución de la instrucción de multiplicación que la precede.

La instrucción `add r3, r0, r0` debe esperar a que se hayan emitido las instrucciones que la preceden a pesar de que no depende de ellas y podría haberse emitido en el ciclo 3, si la emisión fuese desordenada.

También debe comprobarse que no se emiten más de cuatro instrucciones por ciclo. En este caso, como mucho, se emiten tres instrucciones, en el ciclo 11.

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<code>lw r1, 0x1ac</code>	IF	ID	EX	EX										
<code>lw r2, 0xc1f</code>	IF	ID			EX	EX								
<code>add r3, r0, r0</code>	IF	ID			EX									
<code>mul r4, r2, r1</code>	IF	ID				EX	EX	EX	EX					
<code>add r3, r3, r4</code>		IF	ID							EX				
<code>add r5, r0, 0x1ac</code>		IF	ID							EX				
<code>add r6, r0, 0xc1f</code>		IF	ID							EX				
<code>sub r5, r5, #4</code>		IF	ID								EX			
<code>sub r6, r6, #4</code>			IF	ID							EX			
<code>sw (r5), r3</code>			IF	ID								EX		
<code>sw (r6), r4</code>			IF	ID									EX	

b) Emisión desordenada con ventana centralizada

En este caso, hay que respetar las dependencias de datos y las estructurales. En cuanto las instrucciones tengan una unidad disponible y los datos que necesitan se pueden emitir, siempre que no sean **más** de cuatro instrucciones por ciclo las que se emitan. En este caso, como mucho se emiten tres instrucciones en los ciclos 4 y 5

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<code>lw r1, 0x1ac</code>	IF	ID	EX	EX								
<code>lw r2, 0xc1f</code>	IF	ID			EX	EX						
<code>add r3, r0, r0</code>	IF	ID	EX									
<code>mul r4, r2, r1</code>	IF	ID				EX	EX	EX	EX			
<code>add r3, r3, r4</code>		IF	ID							EX		
<code>add r5, r0, 0x1ac</code>		IF	ID	EX								
<code>add r6, r0, 0xc1f</code>		IF	ID	EX								
<code>sub r5, r5, #4</code>		IF	ID		EX							
<code>sub r6, r6, #4</code>			IF	ID	EX							
<code>sw (r5), r3</code>			IF	ID							EX	
<code>sw (r6), r4</code>			IF	ID								EX

c) Estación de reserva con tres líneas para cada unidad funcional, y envío ordenado.

En esta alternativa, se ha supuesto que las instrucciones decodificadas se emiten a una estación de reserva desde la que se accede a la unidad funcional correspondiente enviando las instrucciones de forma ordenada (por eso las dos instrucciones `sw` se ejecutan ordenadamente). La asignación de instrucciones de suma o resta a las tres estaciones de reserva que existen para suma/resta se ha hecho de forma alternativa pero tratando de minimizar tiempos. Es decir, se ha asignado a una estación de reserva que no tuviera su unidad funcional correspondiente **ocupada** para obtener los tiempos más favorables.

ESTACIÓN DE RESERVA	INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
LW	<i>lw r1, 0x1ac</i>	IF	ID	EX										
LW	<i>lw r2, 0xc1f</i>	IF	ID			EX								
ADD(1)	<i>add r3, r0, r0</i>	IF	ID	EX										
MULT(1)	<i>mul r4, r2, r1</i>	IF	ID						EX					
ADD(2)	<i>add r3, r3, r4</i>		IF	ID								EX		
ADD(3)	<i>add r5, r0, 0x1ac</i>		IF	ID	EX									
ADD(1)	<i>add r6, r0, 0xc1f</i>		IF	ID	EX									
ADD(3)	<i>sub r5, r5, #4</i>		IF	ID		EX								
ADD(1)	<i>sub r6, r6, #4</i>			IF	ID	EX								
SW	<i>sw (r5), r3</i>			IF	ID								EX	
SW	<i>sw (r6), r4</i>			IF	ID									EX

Ejercicio 2. Considere que el fragmento de código siguiente:

```

1. lw      r3, 0x10a      ; r3 ← M(0x10a)
2. addi    r2, r0, #128   ; r2 ← r0+128
3. add     r1, r0, 0x0a   ; r1 ← r0+0x0a
4. lw      r4, 0(r1)      ; r4 ← M(r1)
5. lw      r5, -8(r1)     ; r5 ← M(r1-8)
6. mult    r6, r5, r3     ; r6 ← r5*r3
7. add     r5, r6, r3     ; r5 ← r6+r3
8. add     r6, r4, r3     ; r6 ← r4+r3
9. sw      0(r1), r6      ; M(r1) ← r5
10. sw     -8(r1), r5     ; M(r1-8) ← r5
11. sub    r2, r2, #16    ; r2 ← r2-16

```

se ejecuta en un procesador superescalar que es capaz de captar 4 instrucciones/ciclo, de decodificar 2 instrucciones/ciclo; de emitir utilizando una ventana de instrucciones centralizada 2 instrucciones/ciclo; de escribir hasta 2 resultados/ciclo en los registros correspondientes (registros de reorden, o registros de la arquitectura según el caso), y completar (o retirar) hasta 3 instrucciones/ciclo.

Indique el número de ciclos que tardaría en ejecutarse el programa suponiendo finalización ordenada y:

- a) Emisión ordenada
- b) Emisión desordenada

Nota: Considere que tiene una unidad funcional de carga (2 ciclos), una de almacenamiento (1 ciclo), tres unidades de suma/resta (1 ciclo), y una de multiplicación (6 ciclos), y que no hay limitaciones para el número de líneas de la cola de instrucciones, ventana de instrucciones, buffer de reorden, puertos de lectura/escritura etc.)

Solución

a) En la emisión ordenada los instantes en los que las instrucciones empiezan a ejecutarse (etapa EX) deben estar ordenados de menor a mayor, a diferencia de lo que ocurre en la emisión desordenada. Se supone que el procesador utiliza un buffer de reordenamiento (ROB) para que la finalización del procesamiento de las instrucciones sea ordenada. Por ello, las etapas WB de las instrucciones (momento en que se retiran las instrucciones del ROB y se escriben en los registros de la arquitectura) deben estar ordenadas (tanto en el caso de emisión ordenada como desordenada). La etapa marcada como ROB es la que corresponde a la escritura de los resultados en el ROB (se ha supuesto que las instrucciones de escritura en memoria también



consumen un ciclo de escritura en el ROB y un ciclo de escritura WB en el banco de registros, aunque estos ciclos se podrían evitar para estas instrucciones).

También tiene que comprobarse que no se decodifican, emiten, ni escriben en el ROB más de dos instrucciones por ciclo, ni se retiran más de tres instrucciones por ciclo.

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<i>lw</i> <i>r3</i> , 0x10a	IF	ID		EX	ROB	WB													
<i>addi</i> <i>r2</i> , <i>r0</i> , #128	IF	ID	EX	ROB		WB													
<i>add</i> <i>r1</i> , <i>r0</i> , 0x0a	IF		ID	EX	ROB	WB													
<i>lw</i> <i>r4</i> , 0(<i>r1</i>)	IF		ID			EX	ROB	WB											
<i>lw</i> <i>r5</i> , -8(<i>r1</i>)		IF		ID				EX	ROB	WB									
<i>mult</i> <i>r6</i> , <i>r5</i> , <i>r3</i>		IF		ID							EX				ROB	WB			
<i>add</i> <i>r5</i> , <i>r6</i> , <i>r3</i>		IF			ID										EX	ROB	WB		
<i>add</i> <i>r6</i> , <i>r4</i> , <i>r3</i>		IF			ID										EX	ROB	WB		
<i>sw</i> 0(<i>r1</i>), <i>r6</i>			IF			ID										EX	ROB	WB	
<i>sw</i> -8(<i>r1</i>), <i>r5</i>			IF			ID											EX	ROB	WB
<i>sub</i> <i>r2</i> , <i>r2</i> , #16			IF				ID										EX	ROB	WB

b) En el caso de emisión desordenada, la traza de ejecución de las instrucciones es la siguiente:

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>lw</i> <i>r3</i> , 0x10a	IF	ID		EX	ROB	WB												
<i>addi</i> <i>r2</i> , <i>r0</i> , #128	IF	ID	EX	ROB		WB												
<i>add</i> <i>r1</i> , <i>r0</i> , 0x0a	IF		ID	EX	ROB		WB											
<i>lw</i> <i>r4</i> , 0(<i>r1</i>)	IF		ID			EX	ROB	WB										
<i>lw</i> <i>r5</i> , -8(<i>r1</i>)		IF		ID				EX	ROB	WB								
<i>mult</i> <i>r6</i> , <i>r5</i> , <i>r3</i>		IF		ID							EX				ROB	WB		
<i>add</i> <i>r5</i> , <i>r6</i> , <i>r3</i>		IF			ID										EX	ROB	WB	
<i>add</i> <i>r6</i> , <i>r4</i> , <i>r3</i>		IF			ID		EX	ROB									WB	
<i>sw</i> 0(<i>r1</i>), <i>r6</i>			IF			ID		EX	ROB									WB
<i>sw</i> -8(<i>r1</i>), <i>r5</i>			IF			ID										EX	ROB	WB
<i>sub</i> <i>r2</i> , <i>r2</i> , #16			IF				ID	EX		ROB								WB

También en este caso hay que tener en cuenta que no se pueden decodificar, emitir, ni escribir en el ROB más de dos instrucciones por ciclo (obsérvese que la instrucción *sw* *r2*,*r2*,#16 debe esperar un ciclo para su etapa ROB por esta razón), ni se pueden retirar más de tres instrucciones por ciclo.



Ejercicio 3. En el problema anterior, (a) indique qué mejoras realizaría en el procesador para reducir el tiempo de ejecución en la mejor de las opciones sin cambiar el diseño de las unidades funcionales (multiplicador, sumador, etc.) y sin cambiar el tipo de memorias ni la interfaz entre procesador y memoria (no varía el número de instrucciones captadas por ciclo. (b) ¿Qué pasaría si se reduce el tiempo de multiplicación a la mitad?.

Solución

(a) En primer lugar, se considera que se decodifican el mismo número de instrucciones que se captan, ya que no existen limitaciones impuestas por las instrucciones al ritmo de decodificación (éste viene



determinado por las posibilidades de los circuitos de decodificación y la capacidad para almacenar las instrucciones decodificadas hasta que se emitan). También se considera que no existen limitaciones para el número de instrucciones por ciclo que se emiten, escriben el ROB, y se retiran. Por último, se consideran que están disponibles todas las unidades funcionales que se necesiten para que no haya colisiones (riesgos estructurales).

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>lw</i> <i>r3</i> , 0x10a	IF	ID		EX	ROB	WB									
<i>addi</i> <i>r2</i> , <i>r0</i> , #128	IF	ID	EX	ROB		WB									
<i>add</i> <i>r1</i> , <i>r0</i> , 0x0a	IF	ID	EX	ROB		WB									
<i>lw</i> <i>r4</i> , 0(<i>r1</i>)	IF	ID			EX	ROB	WB								
<i>lw</i> <i>r5</i> , -8(<i>r1</i>)		IF	ID		EX	ROB	WB								
<i>mult</i> <i>r6</i> , <i>r5</i> , <i>r3</i>		IF	ID					EX				ROB	WB		
<i>add</i> <i>r5</i> , <i>r6</i> , <i>r3</i>		IF	ID									EX	ROB	WB	
<i>add</i> <i>r6</i> , <i>r4</i> , <i>r3</i>		IF	ID			EX	ROB							WB	
<i>sw</i> 0(<i>r1</i>), <i>r6</i>		IF	ID				EX	ROB						WB	
<i>sw</i> -8(<i>r1</i>), <i>r5</i>			IF	ID									EX	ROB	WB

Teniendo en cuenta las características de la traza, si se redujese el tiempo de la multiplicación a la mitad (es decir tres ciclos) el tiempo de ejecución de dicha traza se reduciría también en esos mismos tres ciclos ya que todas las instrucciones que siguen a la multiplicación se encuentran esperando a que termine esta para poder proseguir. Es decir, la operación de multiplicación es el cuello de botella en este caso.

INSTRUCCIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>lw</i> <i>r3</i> , 0x10a	IF	ID		EX	ROB	WB						
<i>addi</i> <i>r2</i> , <i>r0</i> , #128	IF	ID	EX	ROB		WB						
<i>add</i> <i>r1</i> , <i>r0</i> , 0x0a	IF	ID	EX	ROB		WB						
<i>lw</i> <i>r4</i> , 0(<i>r1</i>)	IF	ID			EX	ROB	WB					
<i>lw</i> <i>r5</i> , -8(<i>r1</i>)		IF	ID		EX	ROB	WB					
<i>mult</i> <i>r6</i> , <i>r5</i> , <i>r3</i>		IF	ID				EX			ROB	WB	
<i>add</i> <i>r5</i> , <i>r6</i> , <i>r3</i>		IF	ID							EX	ROB	WB
<i>add</i> <i>r6</i> , <i>r4</i> , <i>r3</i>		IF	ID			EX	ROB					WB
<i>sw</i> 0(<i>r1</i>), <i>r6</i>			IF	ID			EX	ROB				WB
<i>sw</i> -8(<i>r1</i>), <i>r5</i>			IF	ID						EX	ROB	WB
<i>sub</i> <i>r2</i> , <i>r2</i> , #16			IF	ID	EX	ROB						WB

Por lo tanto se tendrían 12 ciclos. Si se tiene en cuenta que se tienen 11 instrucciones, que el tiempo mínimo que tarda la primera instrucción en salir son 6 ciclos (lo tomamos como tiempo de latencia de inicio del cauce), y que el tiempo total de ejecución en este caso es de 12 ciclos, se puede escribir:

$$T(n) = 12 = \text{TLI} + (n-1) \times \text{CPI} = 6 + (11-1) \times \text{CPI}$$

Y, si se despeja, se tiene que el procesador superescalar presenta una media de 0.6 ciclos por instrucción, o lo que es lo mismo, ejecuta 1.67 instrucciones por ciclo. Tiene un comportamiento superescalar, pero está muy lejos de las tres instrucciones por ciclo que pueden terminar como máximo.



Ejercicio 4. En el caso descrito en el problema 3, indique cómo evolucionaría el buffer de reorden, utilizado para implementar finalización ordenada, en la mejor de las opciones.

Solución

La Tabla que se proporciona a continuación muestra la evolución del buffer de reordenamiento (ROB) marcando en negrita los cambios que se producen en cada ciclo.

- En el ciclo 2 se decodifican las instrucciones (1) – (4) y se introducen en el ROB.
- En el ciclo 3 se decodifican las instrucciones (5) – (8) y se introducen en el ROB.
- En el ciclo 4 se decodifican las instrucciones (9) – (11) y se introducen en el ROB. Simultáneamente se almacena en el ROB los resultados de las instrucciones (2) y (3), cuya ejecución finalizó en el ciclo anterior.
- En el ciclo 5 se escribe en el ROB el resultado de la instrucción (1).
- En el ciclo 6 se retiran las tres primeras instrucciones y se escriben los resultados de las instrucciones (4), (5) y (11) en el ROB.
- En el ciclo 7 se retiran las instrucciones (4) y (5) y se escribe en el ROB el resultado de la instrucción (8).
- En el ciclo 8 se activa el bit valor válido de la instrucción (9) en el ROB, indicando que la instrucción de almacenamiento ya ha escrito en memoria.
- En el ciclo 9 se escribe el resultado de la instrucción (6) en el ROB.
- En el ciclo 10 se retira la instrucción (6) y se escribe el resultado de la instrucción (7) en el ROB.
- En el ciclo 11 se retiran las instrucciones (7), (8) y (9) y se indica que la instrucción (10) ya ha escrito en memoria.
- En el ciclo 12 se retiran las dos últimas instrucciones del ROB.

CICLO	#	CÓDIGO OPERACIÓN	REGISTRO DESTINO	VALOR	VALOR VÁLIDO
2	0	<i>Lw</i>	r3	–	0
	1	<i>Addi</i>	r2	–	0
	2	<i>Add</i>	r1	–	0
	3	<i>Lw</i>	r4	–	0



CICLO	#	CÓDIGO OPERACIÓN	REGISTRO DESTINO	VALOR	VALOR VÁLIDO
3	0	<i>Lw</i>	r3	–	0
	1	<i>Addi</i>	r2	–	0
	2	<i>Add</i>	r1	–	0
	3	<i>Lw</i>	r4	–	0
	4	<i>Lw</i>	r5	–	0
	5	<i>Mult</i>	r6	–	0
	6	<i>Add</i>	r5	–	0
	7	<i>Add</i>	r6	–	0
4	0	<i>Lw</i>	r3	–	0
	1	<i>Addi</i>	r2	128	1
	2	<i>Add</i>	r1	0x0a	1
	3	<i>Lw</i>	r4	–	0
	4	<i>Lw</i>	r5	–	0
	5	<i>Mult</i>	r6	–	0
	6	<i>Add</i>	r5	–	0
	7	<i>Add</i>	r6	–	0
	8	<i>Sw</i>	–	–	0
	9	<i>Sw</i>	–	–	0
	10	<i>Sub</i>	r2	–	0
5	0	<i>Lw</i>	r3	[0x1a]	1
	1	<i>Addi</i>	r2	128	1
	2	<i>Add</i>	r1	0x0a	1
	3	<i>Lw</i>	r4	–	0
	4	<i>Lw</i>	r5	–	0
	5	<i>Mult</i>	r6	–	0
	6	<i>Add</i>	r5	–	0
	7	<i>Add</i>	r6	–	0
	8	<i>Sw</i>	–	–	0
	9	<i>Sw</i>	–	–	0
	10	<i>Sub</i>	r2	–	0
6	3	<i>Lw</i>	r4	[0x0a]	1
	4	<i>Lw</i>	r5	[0x0a – 8]	1
	5	<i>Mult</i>	r6	–	0
	6	<i>Add</i>	r5	–	0
	7	<i>Add</i>	r6	–	0
	8	<i>Sw</i>	–	–	0
	9	<i>Sw</i>	–	–	0
	10	<i>Sub</i>	r2	112	1

CICLO	#	CÓDIGO OPERACIÓN	REGISTRO DESTINO	VALOR	VALOR VÁLIDO
7	5	<i>mult</i>	r6	–	0
	6	<i>add</i>	r5	–	0
	7	<i>add</i>	r6	r4 + r3	1
	8	<i>sw</i>	–	–	0
	9	<i>sw</i>	–	–	0
	10	<i>sub</i>	r2	112	1
8	5	<i>mult</i>	r6	–	0
	6	<i>add</i>	r5	–	0
	7	<i>add</i>	r6	r4 + r3	1
	8	<i>sw</i>	–	–	1
	9	<i>sw</i>	–	–	0
	10	<i>sub</i>	r2	112	1
9	5	<i>mult</i>	r6	r5 × r3	1
	6	<i>add</i>	r5	–	0
	7	<i>add</i>	r6	r4 + r3	1
	8	<i>sw</i>	–	–	1
	9	<i>sw</i>	–	–	0
	10	<i>sub</i>	r2	112	1
10	6	<i>add</i>	r5	r6 + r3	1
	7	<i>add</i>	r6	r4 + r3	1
	8	<i>sw</i>	–	–	1
	9	<i>sw</i>	–	–	0
	10	<i>sub</i>	r2	112	1
11	9	<i>sw</i>	–	–	1
	10	<i>sub</i>	r2	112	1

□

Ejercicio 5. En un procesador superescalar con renombramiento de registros se utiliza un buffer de renombramiento para implementar el mismo. Indique como evolucionarían los registros de renombramiento al realizar el renombramiento para las instrucciones:

1. `mul r2, r0, r1` ; $r2 \leftarrow r0 * r1$
2. `add r3, r1, r2` ; $r3 \leftarrow r1 + r2$
3. `sub r2, r0, r1` ; $r2 \leftarrow r0 - r1$
4. `add r3, r3, r2` ; $r3 \leftarrow r3 + r2$

Solución

Las instrucciones se renombra de forma ordenada, aunque podrían emitirse desordenadamente a medida que estén disponibles los operandos y las unidades funcionales. La estructura típica de un buffer de renombramiento con acceso asociativo podría ser la que se muestra a continuación, en la que se ha supuesto que se han hecho las asignaciones (renombrados) de r0 y r1 (las líneas 0 y 1 tienen valores de “Entrada válida” a 1 correspondiente a los registros r0 y r1, con sus valores válidos correspondientes y los bits de último a 1 indicando que han sido los últimos renombramientos de esos registros)

:

#	Entrada válida	Registro destino	Valor	Valor Válido	Bit de Último
0	1	r0	[r0]	1	1
1	1	r1	[r1]	1	1
2	0				
3	0				
4	0				
5	0				
6	0				
7	0				
8	0				

Al decodificarse la instrucción `mul r2, r0, r1` los valores de r0 y r1 se tomarán de las líneas 0 y 1 del buffer de renombrado y se renombrará r2. La instrucción se puede emitir para su ejecución y el resultado de la misma se almacenará en la línea 2 del buffer de renombrado. El contenido del campo “Valor válido” de esta línea será igual a 0 hasta que el resultado no se haya obtenido

#	Entrada válida	Registro destino	Valor	Valor Válido	Bit de Último
0	1	r0	[r0]	1	1
1	1	r1	[r1]	1	1
2	1	r2		0	1
3	0				
4	0				
5	0				
6	0				
7	0				
8	0				

Después se considera la instrucción `add r3, r1, r2`, como r2 no está disponible no se podrá empezar a ejecutar, pero se utilizará una marca en la estación de reserva indicando que se espera el valor que se escribirá en la línea 2. También se hace el renombrado de r3. El valor de r1 sí se puede tomar de la línea 1.

#	Entrada válida	Registro destino	Valor	Valor Válido	Bit de Último
0	1	r0	[r0]	1	1
1	1	r1	[r1]	1	1
2	1	r2		0	1
3	1	r3		0	1
4	0				
5	0				
6	0				
7	0				
8	0				

Cuando se decodifica la instrucción `sub r2, r0, r1`, se realiza otro renombramiento de r2. Como r0 y r1 tienen valores válidos, esta instrucción podría empezar a ejecutarse si existe una unidad funcional disponible. El resultado de esta operación se almacenará en la línea 4 (último renombrado de r2) y de ahí se tomarán los operandos r2 en instrucciones posteriores (para eso se utiliza el “Bit de Último”):



#	Entrada válida	Registro destino	Valor	Valor Válido	Bit de Último
0	1	r0	[r0]	1	1
1	1	r1	[r1]	1	1
2	1	r2		0	0
3	1	r3		0	1
4	1	r2		0	1
5	0				
6	0				
7	0				
8	0				

La última instrucción, `add r3, r3, r2`, origina otro renombrado de r3. Sus operandos r3 y r2 se tomarían de las líneas 3 y 4 respectivamente porque son los últimos renombrados que se han hecho para r3 y r2. Como no tienen valores válidos, se utilizarán las marcas correspondientes a dichas líneas 3 y 4 del buffer para que se escriban los resultados correspondientes en la línea de la ventana de instrucciones donde se almacena esta instrucción hasta que pueda emitirse.

#	Entrada válida	Registro destino	Valor	Valor Válido	Bit de Último
0	1	r0	[r0]	1	1
1	1	r1	[r1]	1	1
2	1	r2		0	0
3	1	r3		0	0
4	1	r2		0	1
5	1	r3		0	1
6	0				
7	0				
8	0				

Cuando termine `mul r2, r0, r1`, se escribirá el resultado en la línea 1 y podrá continuar `add r3, r1, r2`, y cuando termine `sub r2, r0, r1`, se escribirá el resultado en la línea 4. Cuando termine `add r3, r1, r2`, se escribirá el resultado en la línea 3 y podrá continuar `add r3, r3, r2`.



Ejercicio 6. ◀

Ejercicio 7. En la situación descrita en el problema anterior. ¿Cuál de los tres esquemas es más eficaz por término medio si hay un 25% de probabilidades de que c sea menor o igual a 0, un 30% de que sea mayor o igual a 10; y un 45% de que sea cualquier número entre 1 y 9, siendo todos equiprobables?

Solución

En el ejercicio 6 se ha determinado la penalización de la secuencia para cada tipo de predictor, en este ejercicio se trata de utilizar la distribución de probabilidad de la variable c que se da en el enunciado para evaluar la penalización media de cada predictor, y por lo tanto cuál es el mejor para este código y estas circunstancias. Para el caso del predictor fijo, y teniendo en cuenta que todos los valores de c entre 1 y 9 son equiprobables, tenemos:



$$P_{\text{fijo}} = 0.25 \times P_{\text{fijo}_1} + 0.45 \times P_{\text{fijo}_2} + 0.30 \times P_{\text{fijo}_3} = 0.25 \times 44 + 0.45 \times \left(\frac{\sum_{c=1}^9 (10-c) \times 4}{9} \right) + 0.30 \times 0 = 20 \text{ ciclos}$$

Para el predictor estático tenemos:

$$P_{\text{estático}} = 0.25 \times P_{\text{estático}_1} + 0.45 \times P_{\text{estático}_2} + 0.30 \times P_{\text{estático}_3} = 0.25 \times 4 + 0.45 \times 4 + 0.30 \times 4 = 4 \text{ ciclos}$$

Y para el predictor dinámico:

$$P_{\text{dinámico}} = 0.25 \times P_{\text{dinámico}_1} + 0.45 \times P_{\text{dinámico}_2} + 0.30 \times P_{\text{dinámico}_3} = 0.25 \times 8 + 0.45 \times 8 + 0.30 \times 0 = 5.6 \text{ ciclos}$$

Como se puede ver, para este bucle, y para la distribución de probabilidad de los valores de c , el esquema de predicción más eficiente corresponde a la predicción estática.

En cualquier caso, esta situación depende de las probabilidades de los distintos valores de c . Si, por ejemplo, la probabilidad de que c esté entre 1 y 9 fuera de 0.15, la penalización para la predicción dinámica con 1 bit de historia sería de 3.2 ciclos, mientras que la predicción estática seguiría presentando una penalización de 4 ciclos.



Ejercicio 8. En un programa, una instrucción de salto condicional (a una dirección de salto anterior) dada tiene el siguiente comportamiento en una ejecución de dicho programa:

SSNNNSSNSNSNSSSSN

donde S indica que se produce el salto y N que no. Indique la penalización efectiva que se introduce si se utiliza:

- a) Predicción fija (siempre se considera que se no se va a producir el salto)
- b) Predicción estática (si el desplazamiento es negativo se toma y si es positivo no)
- c) Predicción dinámica con dos bits, inicialmente en el estado (11).
- d) Predicción dinámica con tres bits, inicialmente en el estado (111).

Nota: La penalización por saltos incorrectamente predichos es de 5 ciclos y para los saltos correctamente predichos es 0 ciclos.

Solución

En el caso de usar predicción fija, se produciría un fallo del predictor cada vez que se tome el salto, tal y como muestra la Tabla siguiente. Por tanto, la penalización total sería de:

$$P_{\text{fijo}} = F_{\text{fijo}} \times P = 11 \times 5 = 55 \text{ ciclos}$$



PREDICCIÓN FIJA	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
EJECUCIÓN	S	S	N	N	N	S	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S	S	N
PENALIZACIÓN	P	P				P	P		P		P		P	P	P	P	P	

Si se usa el predictor estático, como la dirección de destino del salto es anterior, se producirá un fallo en la predicción cuando no se produzca el salto, tal y como muestra la tabla correspondiente. Por tanto, la penalización total sería de:

$$P_{\text{estático}} = N_{\text{estático}} \times P = 7 \times 5 = 35 \text{ ciclos}$$

PREDICCIÓN ESTÁTICA	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
EJECUCIÓN	S	S	N	N	N	S	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S	S	N
PENALIZACIÓN			P	P	P			P		P		P						P

En cuanto al predictor dinámico con dos bits de historia, la tabla siguiente muestra el estado del predictor antes de ejecutar el salto, la predicción que realiza el predictor, el comportamiento del salto y si se produce o no penalización. Teniendo en cuenta los fallos que se producen, la penalización total sería de:

$$P_{2 \text{ bits}} = F_{2 \text{ bits}} \times P = 11 \times 5 = 55 \text{ ciclos}$$

ESTADO	11	11	11	10	01	00	01	10	01	10	01	10	01	10	11	11	11	11
PREDICCIÓN DINÁMICA (2 BITS)	S	S	S	S	N	N	N	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S	S
EJECUCIÓN	S	S	N	N	N	S	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S	S	N
PENALIZACIÓN			P	P		P	P	P	P	P	P	P	P					P

Por último, para el predictor dinámico de tres bits, en la tabla siguiente se indican los bits de historia que existen antes de que se ejecute la instrucción, la predicción que determinan esos bits, y lo que finalmente ocurre (según se indica en la secuencia objeto del problema). La última fila indica si ha habido penalización (no coinciden la predicción y lo que ocurre al final). Teniendo en cuenta esta información, tenemos que la penalización total es de:

$$P_{3 \text{ bits}} = F_{3 \text{ bits}} \times P = 10 \times 5 = 50 \text{ ciclos}$$



ESTADO	111	111	111	011	001	000	100	110	011	101	010	101	010	101	110	111	111	111
PREDICCIÓN DINÁMICA (3 BITS)	S	S	S	S	N	N	N	S	S	S	N	S	N	S	S	S	S	S
EJECUCIÓN	S	S	N	N	N	S	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S	S	N
PENALIZACIÓN			P	P		P	P	P		P	P	P	P					P

Como se puede ver, en la secuencia de ejecuciones de la instrucción de salto considerada en este problema, el mejor esquema de predicción es la predicción estática que aquí se utiliza. El esquema de predicción de salto dinámico con dos bits es igual de bueno (o malo) que la predicción fija.

Así, se puede indicar que la eficacia de un esquema de salto depende del perfil de saltos a que de lugar la correspondiente instrucción de salto condicional. En la práctica, los esquemas de predicción dinámica suelen funcionar mejor que los de predicción estática porque las instrucciones de salto suelen repetir el comportamiento de su ejecución previa. En ese sentido, la secuencia utilizada en este problema es bastante atípica.

Ejercicio 9. (NOTA: el tratamiento de excepciones no entra en la evaluación, ya sea control o examen final, porque no lo hemos visto en clase) ◀

Ejercicio 10. (NOTA: el uso de instrucciones con predicado no entraría en la evaluación, ya sea control o examen final, porque no lo hemos visto en clase) ◀◀

2 Cuestiones

Cuestión 1. ¿Qué tienen en común un procesador superescalar y uno VLIW? ¿En qué se diferencian?

Solución

Tanto un procesador superescalar como uno VLIW son procesadores segmentados que aprovechan el paralelismo entre instrucciones (ILP) procesando varias instrucciones u operaciones escalares en cada una de ellas. La diferencia principal entre ellos es que mientras que el procesador superescalar incluye elementos hardware para realizar la planificación de instrucciones (enviar a ejecutar las instrucciones decodificadas independientes para las que existen recursos de ejecución disponibles) dinámicamente, los procesadores superescalares se basan en el compilador para realizar dicha planificación (planificación estática).

Cuestión 2. ¿Qué es un buffer de renombramiento? ¿Qué es un buffer de reordenamiento? ¿Existe alguna relación entre ambos?

Solución

Un buffer de renombramiento es un recurso presente en los procesadores superescalares que permite asignar almacenamiento temporal a los datos asignados a registros del banco de registros de la arquitectura. La asignación de registros de la arquitectura la realiza el compilador o el programador en ensamblador.



Mediante la asignación de registros temporales a los registros de la arquitectura se implementa el renombramiento de estos últimos con el fin de eliminar riesgos (dependencias) WAW y WAR.

Un buffer de reordenamiento permite implementar la finalización ordenada de las instrucciones después su ejecución.

Es posible implementar el renombramiento de registros aprovechando la estructura del buffer de reordenamiento.



Cuestión 3. ¿Qué es una ventana de instrucciones? ¿Y una estación de reserva? ¿Existe alguna relación entre ellas?

Solución

Una ventana de instrucciones es la estructura a la que pasan las instrucciones tras ser decodificadas para ser emitidas desde ahí a la unidad de datos donde se ejecutarán cuando dicha unidad esté libre y los operandos que se necesitan para realizar la correspondiente operación estén disponibles. La emisión desde esa ventana de instrucciones puede ser ordenada o desordenada.

Una estación de reserva es una estructura presente en los procesadores superescalares en los que se distribuye la ventana de instrucciones de forma que en las instrucciones decodificadas se envían a una u otra estación de reserva según la unidad funcional (o el tipo de unidad funcional) donde se va a ejecutar la instrucción.

Una ventana de instrucciones puede considerarse un caso particular de estación de reserva desde la que se puede acceder a todas las unidades funcionales del procesador. La transferencia de una instrucción desde la unidad de decodificación a la estación de reserva se denomina emisión, y desde la estación de reserva correspondiente a la unidad funcional, envío.



Cuestión 4. ¿Qué utilidad tiene la predicación de instrucciones? ¿Es exclusiva de los procesadores VLIW?

Solución

La predicación de instrucciones permite eliminar ciertas instrucciones de salto condicional de los códigos. Por lo tanto, contribuye a reducir el número de riesgos de control (saltos) en la ejecución de programas en procesadores segmentados.

Aunque es una técnica muy importante en el contexto de los procesadores VLIW, porque al reducir instrucciones de salto condicional se contribuye a aumentar el tamaño de los bloques básicos (conjunto de instrucciones con un punto de entrada y un punto de salida), existe la posibilidad de utilizar predicados tanto en procesadores superescalares como VLIW. Por ejemplo, en el conjunto de instrucciones de ARM se pueden predicar todas las instrucciones.



Cuestión 5. ¿En qué momento se lleva a cabo la predicción estática de saltos condiciones? ¿Se puede aprovechar la predicción estática en un procesador con predicción dinámica de saltos?

Solución

La predicción estática se produce en el momento de la compilación teniendo en cuenta el sentido más probable del salto (sobre todo es efectiva en instrucciones de control de bucles).



En el caso de los procesadores con predicción dinámica, se suele tener en cuenta algún tipo de predicción estática para cuando no se dispone de información de historia de la instrucción de salto (en la primera aparición de la misma).



Cuestión 6. ¿Qué procesadores dependen más de la capacidad del compilador, un procesador superescalar o uno VLIW?

Solución

Los procesadores superescalares pueden mejorar su rendimiento gracias a algunas técnicas aplicadas por el compilador, sobre todo en los procesadores de Intel a partir de la microarquitectura P6 que llevaba a cabo una traducción de las instrucciones del repertorio x86 a un conjunto de microoperaciones internas con estructuras fijas como las instrucciones de los repertorios RISC. Sin embargo, el papel del compilador en un procesador VLIW es fundamental, ya que es él el que se encarga de realizar la planificación de las instrucciones para aprovechar el paralelismo entre instrucciones. En los procesadores superescalares existen estructuras como las estaciones de reserva, los buffer de renombramiento, los buffer de reordenamiento, etc. que extraen el paralelismo ILP dinámicamente.



Cuestión 7. ¿Qué procesadores tienen microarquitecturas con mayor complejidad hardware, los superescalares o los VLIW? Indique algún recurso que esté presente en un procesador superescalar y no sea necesario en uno VLIW.

Solución

Los procesadores superescalares son los que tienen una microarquitectura más compleja. Precisamente, la idea de dejar que sea el compilador el responsable de extraer el paralelismo entre instrucciones perseguía conseguir núcleos de procesamiento más sencillos desde el punto de vista hardware para reducir el consumo energético y/o sustituir ciertos elementos hardware por un mayor número de unidades funcionales que permitiesen aumentar el número de operaciones finalizadas por ciclo.

Estructuras como las estaciones de reserva, los buffers de renombramiento, y los buffers de reordenamiento son típicas de los procesadores superescalares.

