

# CA(8) 《指令级并行性》课后作业

姓名：丁彦添 学号：1911406

1. 本题观察软件技术如何从普通矢量循环程序中抽取指令级并行性。下述循环程序称为 DAXPY 循环（双精度  $\alpha X$  加  $Y$ ），是高斯消元法的核心操作。循环程序实现了对长度为 100 的矢量执行矢量操作  $Y = \alpha * X + Y$ 。R1 设置为矢量  $X$  的基地址，R2 设置为  $Y$  的基地址（图略）

假设功能单元的延迟如下表所示（表略）。在 ID 段解决了分支转移指令的一个周期延迟，执行过程是具备完全向前通路的。

- a) 假设单发出(single-issue)流水线。对于浮点数操作和分支延迟，显示编译器调度前和调度后循环程序是怎样的？包括任何停顿或空闲时钟周期。调度前和调度后，结果矢量  $Y$  每个元素的执行时间（以周期为单位）是多少？对于单独使用处理器硬件，其时钟必须提高到多快才能与通过编译器调度所获得的性能改进相同？（忽略增加时钟速度对存储系统性能的影响）。

编译器调度前和调度后循环程序如下表：

时钟周期	调度前	调度后
1	addi x4,x1,#800	addi x4,x1,#800
2	fld f2,0(x1)	fld f2,0(x1)
3	stall	fld f6,0(x2)
4	fmul.d f4,f2,f0	fmul.d f4,f2,f0
5	fld f6,0(x2)	addi x1,x1,#8
6	stall	addi x2,x2,#8
7	stall	sltu x3,x1,x4
8	stall	stall
9	stall	stall
10	fadd.d f6,f4,f6	fadd.d f6,f4,f6
11	stall	stall
12	stall	stall
13	stall	bnez x3,foo
14	fsd f6,0(x2)	fsd f6,-8(x2)
15	addi x1,x1,#8	
16	addi x2,x2,#8	
17	sltu x3,x1,x4	
18	stall	
19	bnez x3,foo	
20	stall	

调度前计算每个矢量Y元素的执行时间为 19 个时钟周期，调度后计算每个矢量Y元素的执行时间为 13 个时钟周期。（第一条指令不参与运算，这是因为计算每一个Y元素不需要执行第一条指令）因此对于单独使用处理器硬件，其时钟必须提高  $(19-13)/13 \approx 46.1\%$ ，才能与在原始硬件上使用调度代码的性能相同。

b) 假设单发出流水线。在没有停顿的前提下，尽可能多地展开循环并调度来分摊循环开销指令，循环可以展开多少次？给出经过调度的指令代码和结果矢量每个元素的执行时间。

最多循环展开3次。

时钟周期	调度后
1	addi x4,x1,#800
2	fld f2,0(x1)
3	fld f6,0(x2)
4	fmul.d f4,f2,f0
5	fld f2,8(x1)
6	fld f10,8(x2)
7	fmul.d f8,f2,f0
8	fld f2,8(x1)
9	fld f14,8(x2)
10	fmul.d f12,f2,f0
11	fadd.d f6,f4,f6
12	addi x1,x1,#24
13	fadd.d f10,f8,f10
14	addi x2,x2,#24
15	sltu x3,x1,x4
16	fadd.d f14,f12,f14
17	fsd f6,-24(x2)
18	fsd f10,-16(x2)
19	bnez x3,foo
20	fsd f14,-8(x2)

由表格知，矢量中平均每个元素的计算时间为 $19/3 \approx 6.33$ 周期（第一条指令不用于计算矢量中的元素）。

c) 假设在指令包含五个操作的VLIW处理器中（如下图所示，图略），比较两种程度的循环展开。首先，展开循环6次，在无任何停顿（如完全空的发出周期）的前提下，抽取指令级并行性和调度来分摊循环开销指令；然后，重复这个过程但展开循环10次。忽略分支指令延迟槽，显示两种调度结果。在每种调度方式下，结果矢量每个分量的执行时间是多少？在每种调度方式下，使用操作槽的百分比是多少？在两种调度方式下，代码量的差异是多少？对于每种调度方式，总的寄存器需求是多少？

展开循环6次：

周期	Memory reference 1	Memory reference 2	FP operation 1	FP operation 2	Integer operation/branch
1	fld f1,0(x1)	fld f2,8(x1)			
2	fld f3,16(x1)	fld f4,24(x1)			
3	fld f5,32(x1)	fld f6,40(x1)	fmul.d f1,f1,f0	fmul.d f2,f2,f0	
4	fld f7,0(x2)	fld f8,8(x2)	fmul.d f3,f3,f0	fmul.d f4,f4,f0	
5	fld f9,16(x2)	fld f10,24(x2)	fmul.d f5,f5,f0	fmul.d f6,f6,f0	
6	fld f11,32(x2)	fld f12,40(x2)			
7					addi x1,x1,48
8					addi x2,x2,48
9			fadd.d f7,f7,f1	fadd.d f8,f8,f2	
10			fadd.d f9,f9,f3	fadd.d f10,f10,f4	
11			fadd.d f11,f11,f5	fadd.d f12,f12,f6	
12					sltu x3,x1, x4
13	fsd -48(x2),f7	fsd -40(x2),f8			
14	fsd -32(x2),f9	fsd -24(x2),f10			
15	fsd -16(x2),f11	fsd -8(x2),f12			bnez x3,foo

每个矢量的分量执行时间为 $15/6=2.5$ 周期,共34条指令,  
操作槽使用百分比是 $34/(15*5)=45.3\%$ , 需要12个寄存器。

展开循环10次:

周期	Memory reference 1	Memory reference 2	FP operation 1	FP operation 2	Integer operation/branch
1	fld f1,0(x1)	fld f2,8(x1)			
2	fld f3,16(x1)	fld f4,24(x1)			
3	fld f5,32(x1)	fld f6,40(x1)	fmul.d f1,f1,f0	fmul.d f2,f2,f0	
4	fld f7,48(x1)	fld f8,56(x1)	fmul.d f3,f3,f0	fmul.d f4,f4,f0	
5	fld f9,64(x1)	fld f10,72(x1)	fmul.d f5,f5,f0	fmul.d f6,f6,f0	
6	fld f11,0(x2)	fld f12,8(x2)	fmul.d f7,f7,f0	fmul.d f8,f8,f0	
7	fld f13,16(x2)	fld f14,24(x2)	fmul.d f9,f9,f0	fmul.d f10,f10,f0	addi x1,x1,48
8	fld f15,32(x2)	fld f16,40(x2)			addi x2,x2,48
9	fld f17,48(x2)	fld f18,56(x2)	fadd.d f11,f11,f1	fadd.d f12,f12,f2	
10	fld f19,64(x2)	fld f20,72(x2)	fadd.d f13,f13,f3	fadd.d f14,f14,f4	
11			fadd.d f15,f15,f5	fadd.d f16,f16,f6	
12			fadd.d f17,f17,f7	fadd.d f18,f18,f8	sltu x3,x1, x4
13	fsd -80(x2),f11	fsd -72(x2),f12	fadd.d f19,f19,f9	fadd.d f20,f20,f10	
14	fsd -64(x2),f13	fsd -56(x2),f14			
15	fsd -48(x2),f15	fsd -40(x2),f6			
16	fsd -32(x2),f17	fsd -24(x2),f18			
17	fsd -16(x2),f19	fsd -8(x2),f20			bnez x3,foo

每个矢量的执行为 $17/10=1.7$ 周期，共54条指令，

操作槽使用百分比是 $54/(17*5)=63.5\%$ ，需要20个寄存器。

2. 本题观察使用Tomasulo算法完成上题循环程序时是如何变化的。功能单元描述如下表所示（表略）。

假设条件如下：

- 功能单元是非流水的。
- 在功能单元之间无向前通路；结果通过公共数据总线(CDB)传输。
- 对 Load 和 Store 指令，执行(EX)流水段完成有效地址计算和存储器访问。由此，流水线为 IF / ID / IS / EX / WB。
- Load 指令需要一个时钟周期。
- 发出(IS)和写回(WB)流水段，每个都需要一个时钟周期。
- 存在 5 个Load 缓存槽和 5 个 Store 缓存槽。
- 假设 BNEZ 分支转移指令需要 1 个时钟周期

a) 使用如下图所示的单发出Tomasulo MIPS流水线，流水线延迟时间由上题对应表给出。针对程序的三次循环，给出每条指令的停顿周期数目和每条指令开始执行（也就是进入第一个EX周期）的时钟周期。每次循环迭代需要多少时钟周期？将结果写成表格的形式，表格的列标题如下：

- 迭代（循环迭代数）
- 指令
- 发出（指令发出的周期）
- 执行（指令执行的周期）
- 访存（存储器访问的周期）
- 写 CDB（结果写到CDB的周期）
- 解释（正在等待指令的描述）

在表格中给出三次循环的结果，可以忽略第一条指令。

迭代	指令	发出	执行	访存	写CDB	注释
1	fld	f2,0(x1)	1	2	3	
1	fmul.d	f4,f2,f0	2	4	19	等待f2
1	fld	f6,0(x2)	3	4	5	
1	fadd.d	f6,f4,f6	4	20	30	等待f4
1	fsd	f6,0(x2)	5	31		等待f6
1	addi	x1,x1,8	6	7	8	
1	addi	x2,x2,8	7	8	9	
1	sltu	x3,x1, x4	8	9	10	
1	bnez	x3,foo	9	11		等待x3
2	fld	f2,0(x1)	10	12	13	等待bnez
2	fmul.d	f4,f2,f0	11	19	34	等待f2
2	fld	f6,0(x2)	12	13	14	
2	fadd.d	f6,f4,f6	13	35	45	等待f4
2	fsd	f6,0(x2)	14	46		等待f6
2	addi	x1,x1,8	15	16	17	
2	addi	x2,x2,8	16	17	18	
2	sltu	x3,x1, x4	17	18	19	
2	bnez	x3,foo	18	20		等待x3
3	fld	f2,0(x1)	19	21	22	等待bnez
3	fmul.d	f4,f2,f0	20	34	49	等待f2
3	fld	f6,0(x2)	21	22	23	
3	fadd.d	f6,f4,f6	22	50	60	等待f4
3	fsd	f6,0(x2)	23	61		等待f6
3	addi	x1,x1,8	24	25	26	
3	addi	x2,x2,8	25	26	27	
3	sltu	x3,x1, x4	26	27	28	
3	bnez	x3,foo	27	29		等待x3

每次循环需要 $61/3 \approx 20.3$ 周期。执行和访存分两列写。

b) 重复问题 a)，但是假设双发出(double-issue)Tomasulo算法和全流水浮点数单元(FU)。

迭代	指令	发出	执行	访存	写CDB	注释
1	fld	f2,0(x1)	1	2	3	
1	fmul.d	f4,f2,f0	1	4	19	等待f2
1	fld	f6,0(x2)	2	3	4	
1	fadd.d	f6,f4,f6	2	20	30	等待f4
1	fsd	f6,0(x2)	3	31		等待f6
1	addi	x1,x1,8	3	4	5	
1	addi	x2,x2,8	4	5	6	
1	sltu	x3,x1, x4	4	6	7	
1	bnez	x3,foo	5	7		
2	fld	f2,0(x1)	6	8	9	等待bnez
2	fmul.d	f4,f2,f0	6	10	25	等待f2
2	fld	f6,0(x2)	7	9	10	
2	fadd.d	f6,f4,f6	7	26	36	等待f4
2	fsd	f6,0(x2)	8	37		等待f6
2	addi	x1,x1,8	8	10	11	
2	addi	x2,x2,8	9	11	12	
2	sltu	x3,x1, x4	9	12	13	
2	bnez	x3,foo	10	14		等待x3
3	fld	f2,0(x1)	11	15	16	等待bnez
3	fmul.d	f4,f2,f0	11	17	32	等待f2
3	fld	f6,0(x2)	12	16	17	
3	fadd.d	f6,f4,f6	12	33	43	等待f4
3	fsd	f6,0(x2)	14	44		等待f6
3	addi	x1,x1,8	15	17		
3	addi	x2,x2,8	16	18		
3	sltu	x3,x1, x4	20	21		
3	bnez	x3,foo	21	22		

每次循环需要 $44/3 \approx 14.7$ 周期。



