

MO401

Arquitetura de Computadores I

2006

Prof. Paulo Cesar Centoducatte

ducatte@ic.unicamp.br

www.ic.unicamp.br/~ducatte

MO401

Arquitetura de Computadores I

Paralelismo em Nível de Instruções Exploração Estática

**"Computer Architecture: A Quantitative
Approach" - (Capítulo 4)**

Paralelismo em Nível de Instruções

Exploração Estática

1. Técnicas de Compilação para Explorar ILP
2. Static Branch Prediction
3. Múltiplos Issue Estático: VLIW
4. Suporte Avançados à Compilação para ILP
5. Suporte de Hardware para Expor mais Paralelismo

Técnicas para redução de stalls

	Technique	Reduces
Capítulo 3 	Dynamic scheduling	Data hazard stalls
	Dynamic branch prediction	Control stalls
	Issuing multiple instructions per cycle	Ideal CPI
	Speculation	Data and control stalls
	Dynamic memory disambiguation	Data hazard stalls involving memory
Capítulo 4 	Loop unrolling	Control hazard stalls
	Basic compiler pipeline scheduling	Data hazard stalls
	Compiler dependence analysis	Ideal CPI and data hazard stalls
	Software pipelining and trace scheduling	Ideal CPI and data hazard stalls
	Compiler speculation	Ideal CPI, data and control stalls

Paralelismo em Nível de Instruções

Exploração Estática

- Até agora exploramos ILP em HW: Reservation Stations, ROB, BTB, Regs. Virtuais ...
- Como o compilador pode ajudar a melhorar o desempenho?
 - reconhecendo e tirando vantagens de ILP, como?
 - » Analisando o código e aplicando transformações que, preservando a semântica, exponha mais paralelismo ILP.

Static Branch Prediction

- Solução mais simples: Predict Taken
 - **average misprediction rate** = frequência de branches não tomados, que para os programas do SPEC é 34%.
 - **misprediction rate** varia de 59% a 9%
- Predição baseada na direção do branch?
 - **backward-going branches**: **taken** -> loop
 - **forward-going branches**: **not taken** -> if?
 - Programas SPEC: maioria dos **forward-going branches** são tomados => **taken** é melhor
- Predição baseada em informações de **profile** (coletadas em execuções anteriores).
 - **Misprediction** varia de 5% a 22%

Exemplo

Considere o seguinte código:

```
for (i=1000; i>0; i=i-1)
    x[i] = x[i] + s;
```

Assuma as seguintes latências para os exemplos a seguir:

<i>Instr. produzindo resultado</i>	<i>Instrução usando resultado</i>	<i>Execução em ciclos</i>	<i>Latência em ciclos</i>
FP ALU op	Another FP ALU op	4	3
FP ALU op	Store double	3	2
Load double	FP ALU op	1	1
Load double	Store double	1	0
Integer op	Integer op	1	0

Forwarding

Pipeline Scheduling e Loop Unrolling

Exemplo: seja o loop abaixo

```
for (i=1; i<=1000; i++)  
    x(i) = x(i) + s;
```

E o assembler equivalente

```
Loop: LD      F0, 0(R1) ;F0 = elemento do vetor - x(i)  
      ADDD   F4, F0, F2 ;add escalar em F2  
      SD     0(R1), F4 ;armazena o resultado  
      SUBI   R1, R1, 8 ;decrementa o pointer 8bytes (DW)  
      BNEZ   R1, Loop ;branch R1!=zero  
      NOP                    ;delayed branch slot
```

Onde estão os stalls?

FP Loop Hazards - MIPS

Loop: LD **F0**,0(R1) ;F0=elemento do vetor - x(i)
ADDD **F4**,**F0**,F2 ;add escalar em F2
SD 0(R1),**F4** ;armazena o resultado
SUBI R1,R1,8 ;decrementa o pointer 8bytes (DW)
BNEZ R1,Loop ;branch R1!=zero
NOP ;delayed branch slot

Assuma as seguintes latências:

<i>Instr. produzindo resultado</i>	<i>Instrução usando resultado</i>	<i>Latência em ciclos de clock</i>
FP ALU op	Another FP ALU op	3
FP ALU op	Store double	2
Load double	FP ALU op	1
Load double	Store double	0
Integer op	Integer op	0

FP Loop - Stalls

```
1 Loop: LD    F0, 0(R1)    ;F0=elemento do vetor
2          stall
3        ADDD  F4, F0, F2    ;add escalar em F2
4          stall
5          stall
6        SD    0(R1), F4    ;armazena o resultado
7        SUBI  R1, R1, 8    ;decrementa o pointer 8Byte (DW)
8          stall
9        BNEZ  R1, Loop    ;branch R1!=zero
10       stall             ;delayed branch slot
```

<i>Instr. produzindo resultado</i>	<i>Instrução usando resultado</i>	<i>Latência em ciclos de clock</i>
FP ALU op	Another FP ALU op	3
FP ALU op	Store double	2
Load double	FP ALU op	1
Load double	Store double	0
Integer op	Integer op	0

10 clocks: reescreva o código minimizando os stalls?

FP Loop: Minimizando Stalls Refazendo o Escalonamento

```

1 Loop: LD      F0, 0(R1)
2      SUBI    R1, R1, 8
3      ADDD   F4, F0, F2
4      stall
5      BNEZ   R1, Loop ;delayed branch
6      SD     8(R1), F4 ; R1 alterado por SUBI
    
```

Trocar a ordem das instruções e ajustar o endereço de SD

Latências para Operações FP

<i>Instr. produzindo resultado</i>	<i>Instrução usando resultado</i>	<i>Latência em ciclos de clock</i>
FP ALU op	Another FP ALU op	3
FP ALU op	Store double	2
Load double	FP ALU op	1
Load double	Store Double	0

Agora: 6 clocks. Como melhorar ainda mais?

Loop Unrolling

Loop unrolling: minimizando os Stalls

```
1 Loop: L.D    F0, 0 (R1)
2      ADD.D   F4, F0, F2
3      S.D     0 (R1), F4
4      L.D     F6, -8 (R1)
5      ADD.D   F8, F6, F2
6      S.D     -8 (R1), F8
7      L.D     F10, -16 (R1)
8      ADD.D   F12, F10, F2
9      S.D     -16 (R1), F12
10     L.D     F14, -24 (R1)
11     ADD.D   F16, F14, F2
12     S.D     -24 (R1), F16
13     DSUBUI  R1, R1, #32
14     BNEZ    R1, LOOP
15     NOP
```

1 cycle stall

2 cycles stall

; Sem DSUBUI & BNEZ

; Sem DSUBUI & BNEZ

; Sem DSUBUI & BNEZ

; alterado para 4*8

Rewrite loop to minimize stalls?

$15 + 4 \times (1+2) = 27$ clock cycles, ou 6.8 por iteração
Assumindo R1 como múltiplo de 4

Aplicando Loop Unrolling: 4 vezes

1 Loop:	LD	F0,0(R1)
2	stall	
3	ADDD	F4,F0,F2
4	stall	
5	stall	
6	SD	0(R1),F4
7	LD	F6,-8(R1)
8	stall	
9	ADDD	F8,F6,F2
10	stall	
11	stall	
12	SD	-8(R1),F8
13	LD	F10,-16(R1)
14	stall	

15	ADDD	F12,F10,F2
16	stall	
17	stall	
18	SD	-16(R1),F12
19	LD	F14,-24(R1)
20	stall	
21	ADDD	F16,F14,F2
22	stall	
23	stall	
24	SD	-24(R1),F16
25	SUBI	R1,R1,#32
26	BNEZ	R1,LOOP
27	stall	
28	NOP	

$15 + 4 \times (1+2) + 1 = 28$ ciclos de clock, ou 7 por iteração. (- 3 branches e 3 SUBI)

Assumindo que R1 é múltiplo de 4, reescreva o loop minimizando os Stalls.

Loop unrolling: minimizando os Stalls

```
1 Loop: LD      F0,0(R1)
2      LD      F6,-8(R1)
3      LD      F10,-16(R1)
4      LD      F14,-24(R1)
5      ADDD    F4,F0,F2
6      ADDD    F8,F6,F2
7      ADDD    F12,F10,F2
8      ADDD    F16,F14,F2
9      SD      0(R1),F4
10     SD      -8(R1),F8
11     SD      -16(R1),F12
12     SUBI    R1,R1,#32
13     BNEZ    R1,LOOP
14     SD      8(R1),F16
```

O que foi feito

- Store após SUBI, com alteração no reg.
- Loads antes dos Stores: pega os dados logo.
- Quando isso é factível pelo compilador?

Sem Stalls

; 8-32 = -24

14 ciclos de clock ou 3.5 por iteração

Loop Unrolling: O que fazer? (ou o que foi feito no exemplo)

- Determinar se é possível mover **SD** para após o **SUBI** e **BNEZ** e calcular o ajuste do **offset de SD**.
- Determinar se desdobrar o loop será útil avaliando-se se não há dependência entre iterações do loop, exceto para o controle do loop.
- Usar registradores diferentes, evitando restrições desnecessárias forçadas pelo uso do mesmo registrador para operações independentes.
- Eliminar os testes extras e **branches** e ajustes no código de controle do loop.
- Determinar se os **loads** e **stores** podem ser, no loop desdobrado, trocados de lugar baseado em que **loads** e **stores** de iterações diferentes são independentes. **Isto requer uma análise de endereçamento de memória e determinar que eles não são o mesmo endereço.**
- Escalonar o código preservando todas as dependências necessárias a se manter a semântica do código original.

Loop Unrolling: n Iterações, Como Tratar?

- Em geral não conhecemos a priori o número de iterações e nem mesmo um limite superior para ele
- Suponha que o número de iterações seja n e queremos desdobrar o loop em k cópias do seu corpo
- No lugar de gerarmos um único loop (**novo**) desdobrado geramos um par de loops consecutivos:
 - 1º loop: executa ($n \bmod k$) vezes e tem o corpo do loop original
 - 2º loop: é um loop com o corpo original desdobrado em K e que executa (n/k) vezes (**divisão inteira**)
 - Para valores grandes de n a maior parte do tempo de execução é gasta no loop desdobrado.

Compilador: Movimentação de Código

- O Compilador deve focar nas dependências existentes no programa e não se os hazards dependem de um dado pipeline
- Tentar produzir um escalonamento que evite os hazards que reduzem o desempenho
- (True) **Data dependencies (RAW)**
 - Instrução i produz um resultado usado pela instrução j, ou
 - Instrução j é dependente de dados da instrução k e a instrução k é dependente de dados da instrução i.
- Se dependente, não podem ser executadas em paralelo
- Fácil de ser determinado em registradores (nomes "únicos")
- Difícil para memória (problema denominado "**memory disambiguation**"):
 - Ex.: $100(R4) = 20(R6)?$
 - E em diferentes iterações do loop: $20(R6) = 20(R6)$ e $100(R4) = 20(R6)?$

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Dados

- Aonde está a dependência de Dados?

1 Loop:	LD	F0, 0(R1)	
2	ADDD	F4, F0, F2	
3	SUBI	R1, R1, 8	
4	BNEZ	R1, Loop	;delayed branch
5	SD	8(R1), F4	;alterado pelo movimento de SUBI

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Nome

- **Name Dependence:**
duas instruções usam o mesmo nome (registrador ou memória) mas não compartilham dados
- **Anti-dependence** (WAR se há um hazard no HW)
 - Instrução j escreve em um registrador (ou posição de memória) que é lido pela instrução i e i é executado primeiro
- **Output dependence** (WAW se há um hazard no HW)
 - Instruções i e j escrevem no mesmo registrador (ou posição de memória); a ordem das instruções deve ser preservada.

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Nome.

Aonde esta?

```
1 Loop: LD      F0,0(R1)
2      ADDD    F4,F0,F2
3      SD      0(R1),F4
4      LD      F0,-8(R1)
5      ADDD    F4,F0,F2
6      SD      -8(R1),F4
7      LD      F0,-16(R1)
8      ADDD    F4,F0,F2
9      SD      -16(R1),F4
10     LD      F0,-24(R1)
11     ADDD    F4,F0,F2
12     SD      -24(R1),F4
13     SUBI    R1,R1,#32
14     BNEZ   R1,LOOP
15     NOP
```

Nenhum dado é passado por F0, porém F0 não pode ser reusado no ciclo 4.

Como remover essa dependência?

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Nome.

Aonde esta?

```
1 Loop: LD      F0, 0(R1)
2      ADDD    F4, F0, F2
3      SD      0(R1), F4
4      LD      F6, -8(R1)
5      ADDD    F8, F6, F2
6      SD      -8(R1), F8
7      LD      F10, -16(R1)
8      ADDD    F12, F10, F2
9      SD      -16(R1), F12
10     LD      F14, -24(R1)
11     ADDD    F16, F14, F2
12     SD      -24(R1), F16
13     SUBI    R1, R1, #32
14     BNEZ    R1, LOOP
15     NOP
```

Agora só existe dependência de dados.

“register renaming”

Compilador: Movimentação de Código Dependência de Nome.

- Dependência de Nome é difícil de ser determinada para acessos à memória
 - $100(R4) = 20(R6)$?
 - Para iterações diferentes do loop, $20(R6) = 20(R6)$?
- No exemplo é necessário que o compilador determine que se R1 não é alterado então:

$$0(R1) \neq -8(R1) \neq -16(R1) \neq -24(R1)$$

e não existem dependências entre os **loads** e **stores** e assim a ordem de execução entre eles pode ser alterada

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Controle

- Exemplo

```
if p1 {S1; };  
if p2 {S2; };
```

S1 é dependente de controle de p1 e S2 é dependente de controle de p2, mas não de p1.

Compilador: Movimentação de Código Dependência de Controle

- Duas restrições devido a dependência de controle:
 - Uma instrução dependente de controle de um branch não pode ser movido para antes do branch, pois sua execução deixaria de ser controlada por ele.
 - Uma instrução que não é dependente de controle de um branch não pode ser movida para depois do branch, pois sua execução passaria a ser controlada por ele.
- Pode-se relaxar a dependência de controle para ter mais paralelismo, porém deve-se preservar o efeito da ordem de exceções e o fluxo de dados (manter a semântica).

Compilador: Movimentação de Código

Dependência de Controle

```
1 Loop: LD      F0 0(R1)
2      ADDD   F4, F0, F2
3      SD     0(R1), F4
4      SUBI   R1, R1, 8
5      BEQZ   R1, exit
6      LD     F0, 0(R1)
7      ADDD   F4, F0, F2
8      SD     0(R1), F4
9      SUBI   R1, R1, 8
10     BEQZ   R1, exit
11     LD     F0, 0(R1)
12     ADDD   F4, F0, F2
13     SD     0(R1), F4
14     SUBI   R1, R1, 8
15     BEQZ   R1, exit
....
```

Aonde estão as
dependências de controle?

Paralelismo em Loops

loop unrolling

- Exemplo: Aonde estão as dependências de dados?
(A,B,C distintos & sem overlapping)

```
for (i=1; i<=100; i=i+1) {  
    A[i+1] = A[i] + C[i];    /* S1 */  
    B[i+1] = B[i] + A[i+1]; /* S2 */  
}
```

1. S2 usa o valor, $A[i+1]$, computado por S1 na mesma iteração.
2. S1 usa um valor computado por S1 na iteração anterior, logo iteração i computa $A[i+1]$ que é lido na iteração $i+1$. O mesmo ocorre com S2 para $B[i]$ e $B[i+1]$.

Isto é denominado “**loop-carried dependence**”. São dependências entre iterações

- Implica que as iterações são dependentes, e não podem ser executadas em paralelo, certo??
- Note, para o exemplo, que as iterações são distintas.

Loop-Carried Dependence

Não há paralelismo?

Considere:

```
for (i=0; i < 8; i=i+1) {  
    A = A + C[i];      /* S1 */  
}
```

E a Computação:

```
"Ciclo 1": temp0 = C[0] + C[1];  
           temp1 = C[2] + C[3];  
           temp2 = C[4] + C[5];  
           temp3 = C[6] + C[7];  
"Ciclo 2": temp4 = temp0 + temp1;  
           temp5 = temp2 + temp3;  
"Ciclo 3":  A = temp4 + temp5;
```

Possível devido a natureza associativa da "+".

Paralelismo em Loops

loop unrolling

- Exemplo: Onde estão as dependências de dados?
(A,B,C distintos & sem overlapping)

```
for (i=1; i<=100; i=i+1) {  
    A[i+1] = A[i] + B[i];    /* S1 */  
    B[i+1] = C[i] + D[i];    /* S2 */  
}
```

1. Não há dependência entre S1 e S2. Se houver, então será uma dependência cíclica e o loop não poderá ser paralelizável. Como não há dependência então pode-se trocar a ordem de execução das sentenças sem afetar o resultado de S2
2. Na primeira iteração do loop, a sentença S1 depende do valor B[1] computado antes da iniciar a execução do loop.

Paralelismo em Loops

loop unrolling

Original:

```
for (i=1; i<=100; i=i+1) {  
    A[i] = A[i] + B[i];    /* S1 */  
    B[i+1] = C[i] + D[i]; /* S2 */  
}
```

Sem dependências
circulares.

Loop causa dependência
em B.

Modificado:

```
A[1] = A[1] + B[1];  
for (i=1; i<=99; i=i+1) {  
    B[i+1] = C[i] + D[i];  
    A[i+1] = A[i+1] + B[i+1];  
}  
B[101] = C[100] + D[100];
```

Eliminada a dependência
de loop.

Loop Unrolling em Superscalar Múltiplos Issue

SuperScalar Versão do MIPS

	<i>Integer instruction</i>	<i>FP instruction</i>	<i>Clock cycle</i>
Loop:	LD F0,0(R1)		1
	LD F6,-8(R1)		2
	LD F10,-16(R1)	ADDD F4,F0,F2	3
	LD F14,-24(R1)	ADDD F8,F6,F2	4
	LD F18,-32(R1)	ADDD F12,F10,F2	5
	SD 0(R1),F4	ADDD F16,F14,F2	6
	SD -8(R1),F8	ADDD F20,F18,F2	7
	SD -16(R1),F12		8
	SD -24(R1),F16		9
	SUBI R1,R1,#40		10
	BNEZ R1,LOOP		11
	SD 8(R1),F20		12

- Desenrolado 5 vezes para evitar delays
- 12 clocks, ou 2.4 clocks por iteração

Loop Unrolling em Superscalar Dinâmico

Múltiplos Issue

Múltiplas Instruções Issue & Scheduling Dinâmico

<i>Iteration no.</i>	<i>Instructions</i>	<i>Issues</i>	<i>Executes</i>	<i>Writes result</i>
			<i>clock-cycle number</i>	
1	LD F0,0(R1)	1	2	4
1	ADDD F4,F0,F2	1	5	8
1	SD 0(R1),F4	2	9	
1	SUBI R1,R1,#8	3	4	5
1	BNEZ R1,LOOP	4	5	
2	LD F0,0(R1)	5	6	8
2	ADDD F4,F0,F2	5	9	12
2	SD 0(R1),F4	6	13	
2	SUBI R1,R1,#8	7	8	9
2	BNEZ R1,LOOP	8	9	

- 4 clocks por iteração

Branches, Decrementos gastam 1 ciclo de clock

Loop Unrolling em VLIW Múltiplos Issue

<i>Memory reference 1</i>	<i>Memory reference 2</i>	<i>FP operation 1</i>	<i>FP op. 2</i>	<i>Int. op/branch</i>	<i>Clock</i>
LD F0,0(R1)	LD F6,-8(R1)				1
LD F10,-16(R1)	LD F14,-24(R1)				2
LD F18,-32(R1)	LD F22,-40(R1)	ADDD F4,F0,F2	ADDD F8,F6,F2		3
LD F26,-48(R1)		ADDD F12,F10,F2	ADDD F16,F14,F2		4
		ADDD F20,F18,F2	ADDD F24,F22,F2		5
SD 0(R1),F4	SD -8(R1),F8	ADDD F28,F26,F2			6
SD -16(R1),F12	SD -24(R1),F16				7
SD -32(R1),F20	SD -40(R1),F24			SUBI R1,R1,#48	8
SD -0(R1),F28				BNEZ R1,LOOP	9

- Desenrolado 7 vezes para evitar delays
- 7 resultados em 9 clocks, ou 1.3 clocks por iteração
- É necessário mais registradores para uso efetivo do VLIW

Loop Level Parallelism

```
/* *****  
This is the example on page 305 of Hennessy &  
Patterson but running on an Intel Machine  
***** */  
  
#define      MAX      1000  
#define      ITER     100000  
int         main( int argc, char argv[] )  
{  
    double   x[MAX + 2];  
    double   s = 3.14159;  
    int      i, j;  
  
    for ( i = MAX; i > 0; i-- )    /* Init array */  
        x[i] = 0;  
  
    for ( j = ITER; j > 0; j-- )  
        for ( i = MAX; i > 0; i-- )  
            x[i] = x[i] + s;  
}
```

Compilers and ILP

Loop Level Parallelism

Example 1

Elapsed seconds = 0.590026

This is the GCC optimized code

.L15:

```
fldl (%ecx,%eax)
fadd %st(1),%st
decl %edx
fstpl (%ecx,%eax)
addl $-8,%eax
testl %edx,%edx
jg .L15
```

Elapsed seconds = 0.122848

This is the ICC optimized code

.L2:

```
fstpl 8(%esp,%edx,8)
fldl (%esp,%edx,8)
fadd %st(1),%st
fldl -8(%esp,%edx,8)
fldl -16(%esp,%edx,8)
fldl -24(%esp,%edx,8)
fldl -32(%esp,%edx,8)
fxch %st(4)
fstpl (%esp,%edx,8)
fxch %st(2)
fadd %st(4),%st
fstpl -8(%esp,%edx,8)
fadd %st(3),%st
fstpl -16(%esp,%edx,8)
fadd %st(2),%st
fstpl -24(%esp,%edx,8)
fadd %st(1),%st
addl $-5,%edx
testl %edx,%edx
jg .L2 # Prob 99%
fstpl 8(%esp,%edx,8)
```

Loop Level Parallelism

```
// Example on Page 320
get_current_time( &start_time );
for ( j = ITER; j > 0; j-- )
{
    for ( i = 1; i <= MAX; i++ )
    {
        A[i+1] = A[i] + C[i];
        B[i+1] = B[i] + A[i+1];
    }
}
get_current_time( &end_time );
```

There are
two depend-
encies here –
what are
they?

Compilers and ILP

Loop Level Parallelism

Example 2

Elapsed seconds = 1.357084

This is GCC optimized code

```
.L55:
    fldl  -8(%esi,%eax)
    faddl -8(%edi,%eax)
    fstl  (%esi,%eax)
    faddl -8(%ecx,%eax)
    incl  %edx
    fstpl (%ecx,%eax)
    addl  $8,%eax
    cmpl  $1000,%edx
    jle  .L55
```

This is Microsoft optimized code

```
$L1225:
    fld  QWORD PTR _C$[esp+eax+40108]
    add  eax, 8
    cmp  eax, 7992
    fadd QWORD PTR _A$[esp+eax+40100]
    fst  QWORD PTR _A$[esp+eax+40108]
    fadd QWORD PTR _B$[esp+eax+40100]
    fstp QWORD PTR _B$[esp+eax+40108]
    jle  $L1225
```

Elapsed seconds = 0.664073

This is the ICC optimized code

```
.L4:
    fstpl 25368(%esp,%edx,8)
    fldl  8472(%esp,%edx,8)
    faddl 16920(%esp,%edx,8)
    fldl  25368(%esp,%edx,8)
    fldl  16928(%esp,%edx,8)
    fxch  %st(2)
    fstl  8480(%esp,%edx,8)
    fadd  %st,%st(1)
    fxch  %st(1)
    fstl  25376(%esp,%edx,8)
    fxch  %st(2)
    faddp %st,%st(1)
    fstl  8488(%esp,%edx,8)
    faddp %st,%st(1)
    addl  $2,%edx
    cmpl  $1000,%edx
    jle  .L4 # Prob 99%
    fstpl 25368(%esp,%edx,8)
```

Loop Level Parallelism

```
// Example on Page 321
get_current_time( &start_time );

for ( j = ITER; j > 0; j-- )
{
    for ( i = 1; i <= MAX; i++ )
    {
        A[i]    = A[i] + B[i];
        B[i+1] = C[i] + D[i];
    }
}
get_current_time( &end_time );
```

What are the dependencies here??

Compilers and ILP

Loop Level Parallelism

Example 3

Elapsed seconds = 1.370478

This is the GCC optimized code

```
.L65:
    fldl  (%esi,%eax)
    faddl (%ecx,%eax)
    fstpl (%esi,%eax)
    movl  -40100(%ebp),%edi
    fldl  (%edi,%eax)
    movl  -40136(%ebp),%edi
    faddl (%edi,%eax)
    incl  %edx
    fstpl 8(%ecx,%eax)
    addl  $8,%eax
    cmpl  $1000,%edx
    jle  .L65
```

Elapsed seconds = 0.325419

This is the ICC optimized code

```
.L6:
    fstpl 8464(%esp,%edx,8)
    fldl 8472(%esp,%edx,8)
    faddl 25368(%esp,%edx,8)
    fldl 16920(%esp,%edx,8)
    faddl 33824(%esp,%edx,8)
    fldl 8480(%esp,%edx,8)
    fldl 16928(%esp,%edx,8)
    faddl 33832(%esp,%edx,8)
    fxch  %st(3)
    fstpl 8472(%esp,%edx,8)
    fxch  %st(1)
    fstl 25376(%esp,%edx,8)
    fxch  %st(2)
    fstpl 25384(%esp,%edx,8)
    faddp %st,%st(1)
    addl  $2,%edx
    cmpl  $1000,%edx
    jle  .L6 # Prob 99%
    fstpl 8464(%esp,%edx,8)
```

Loop Level Parallelism

```
// Example on Page 322
get_current_time( &start_time );
for ( j = ITER; j > 0; j-- )
{
    A[1]    = A[1] + B[1];
    for ( i = 1; i <= MAX - 1; i++ )
    {
        B[i+1] = C[i] + D[i];
        A[i+1] = A[i+1] + B[i+1];
    }
    B[101]    = C[100] + D[100];
}
get_current_time( &end_time );
```

Elapsed seconds =
1.200525

How many
depend-
encies
here??

Compilers and ILP

Loop Level Parallelism

Example 4

Elapsed seconds = 1.200525

This is the GCC optimized code

```
.L75:
    movl -40136(%ebp), %edi
    fldl -8(%edi, %eax)
    faddl -8(%esi, %eax)
    movl -40104(%ebp), %edi
    fstl (%edi, %eax)
    faddl (%ecx, %eax)
    incl %edx
    fstpl (%ecx, %eax)
    addl $8, %eax
    cmpl $999, %edx
    jle .L75
```

This is the Microsoft optimized code

```
$L1239
    fld     QWORD PTR _D$[esp+eax+40108]
    add     eax, 8
    cmp     eax, 7984          ; 00001f30H
    fadd    QWORD PTR _C$[esp+eax+40100]
    fst     QWORD PTR _B$[esp+eax+40108]

    fadd    QWORD PTR _A$[esp+eax+40108]
    fstp    QWORD PTR _A$[esp+eax+40108]
    jle     SHORT $L1239
```

Loop Level Parallelism

Example 4

This is the ICC optimized code

```
.L8:
    fstpl    8472(%esp,%edx,8)
    fldl    16920(%esp,%edx,8)
    faddl    33824(%esp,%edx,8)
    fldl    8480(%esp,%edx,8)
    fldl    16928(%esp,%edx,8)
    faddl    33832(%esp,%edx,8)
    fldl    8488(%esp,%edx,8)
    fldl    16936(%esp,%edx,8)
    faddl    33840(%esp,%edx,8)
    fldl    8496(%esp,%edx,8)
    fxch    %st(5)
```

Elapsed seconds = 0.359232

CONTINUED

```
    fstpl    25376(%esp,%edx,8)
    fxch    %st(3)
    fstpl    25384(%esp,%edx,8)
    fxch    %st(1)
    fstpl    25392(%esp,%edx,8)
    fxch    %st(3)
    faddp    %st,%st(4)
    fxch    %st(3)
    fstpl    8480(%esp,%edx,8)
    faddp    %st,%st(2)
    fxch    %st(1)
    fstpl    8488(%esp,%edx,8)
    faddp    %st,%st(1)
    addl    $3,%edx
    cmpl    $999,%edx
    jle    .L8
    fstpl    8472(%esp,%edx,8)
```

Suporte de Compiladores para ILP

Como os compiladores podem ser mais espertos?

1. Produzindo um bom scheduling para o código.
2. Determinando quais loops podem conter paralelismo.
3. Eliminando dependências de nome.

Compiladores devem ser muito espertos para se livrarem de **alias**es - apontadores em C são um problema.

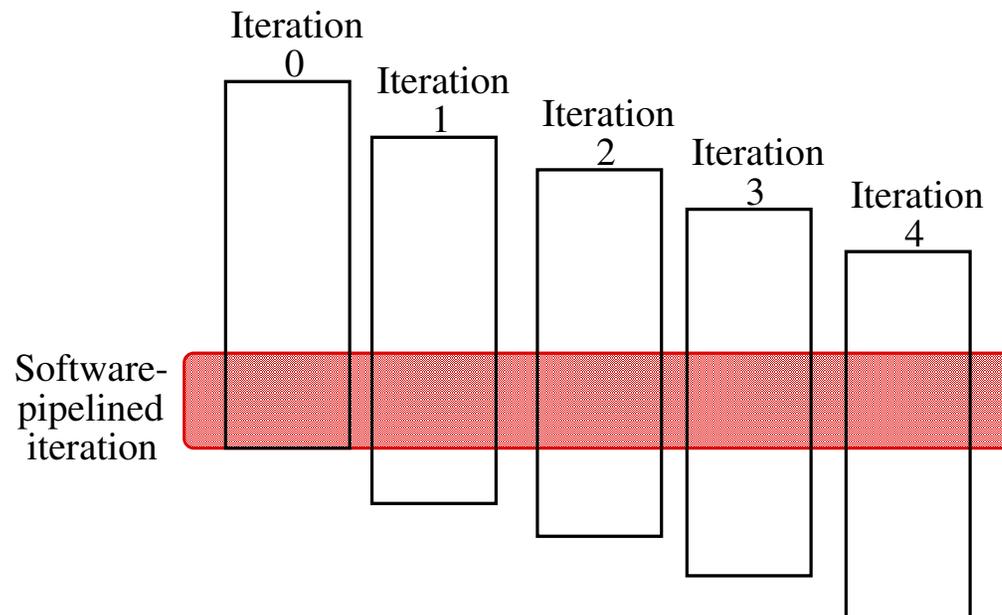
Técnicas utilizadas:

Symbolic Loop Unrolling
Critical Path Scheduling

Software Pipelining

Symbolic Loop Unrolling

- Observação: se as iterações dos loops são independentes, então é possível ter mais ILP executando instruções de diferentes iterações
- **Software pipelining**: reorganiza o loop de forma que em cada iteração sejam executadas instruções escolhidas de diferentes iterações do loop original (~ Tomasulo em SW)



Software Pipelining

Symbolic Loop Unrolling

Exemplo: Soma dos elementos de um vetor com uma constante em F2

```
Loop:  L.D    F0, 0(R1)
        ADD.D F4, F0, F2
        S.D   0(R1), F4
        DSUBUI R1, R1, #24
        BNEZ  R1, LOOP
```

Software Pipelining: Exemplo

Antes: Desenrolar 3 vezes

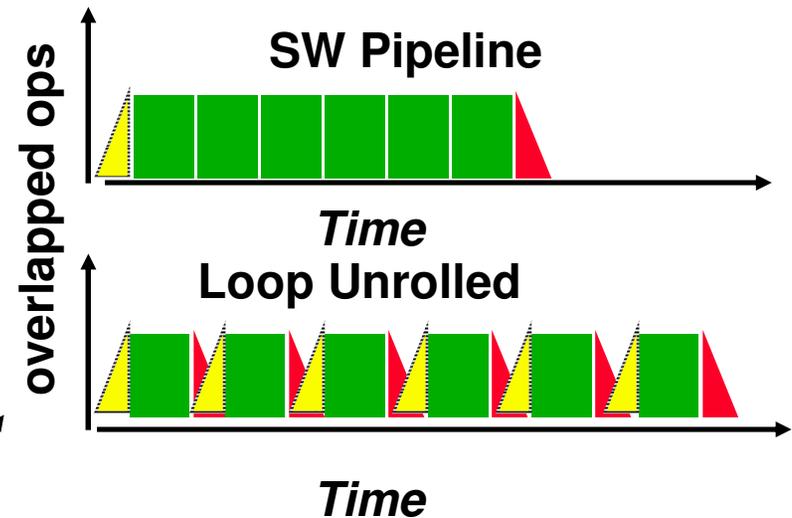
```

1  L.D  F0, 0(R1)
2  ADD.D F4, F0, F2
3  S.D  0(R1), F4
4  L.D  F6, -8(R1)
5  ADD.D F8, F6, F2
6  S.D  -8(R1), F8
7  L.D  F10, -16(R1)
8  ADD.D F12, F10, F2
9  S.D  -16(R1), F12
10 DSUBUI R1, R1, #24
11 BNEZ  R1, LOOP
    
```

Depois: Software Pipelined

```

1  S.D  0(R1), F4 ; Stores M[i]
2  ADD.D F4, F0, F2 ; Adds to M[i-1]
3  L.D  F0, -16(R1); Loads M[i-2]
4  DSUBUI R1, R1, #8
5  BNEZ  R1, LOOP
    
```



- Loop Unrolling Simbólico
 - Maximiza a distância resultado-uso
 - Menos código que unrolling

5 ciclos por iteração

Software Pipelining: Exemplo

Antes: desenrolar 3 vezes

```

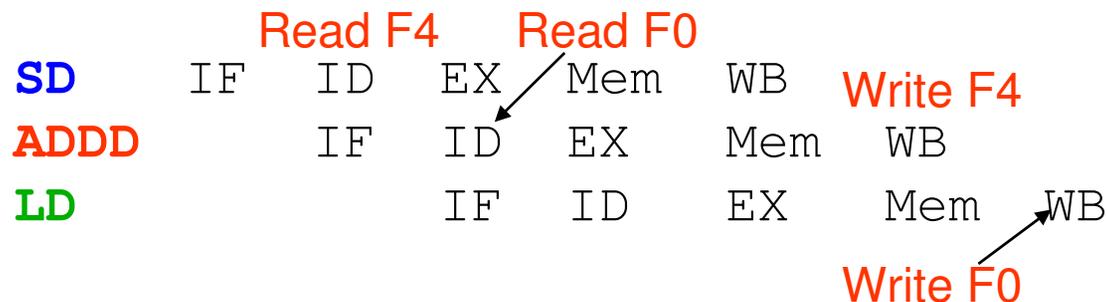
1 LD    F0, 0(R1)
2 ADDD  F4, F0, F2
3 SD    0(R1), F4
4 LD    F6, -8(R1)
5 ADDD  F8, F6, F2
6 SD    -8(R1), F8
7 LD    F10, -16(R1)
8 ADDD  F12, F10, F2
9 SD    -16(R1), F12
10 SUBI R1, R1, #24
11 BNEZ R1, LOOP
    
```

Após: Software Pipelined

```

LD    F0, 0(R1)
ADDD  F4, F0, F2
LD    F0, -8(R1)
    
```

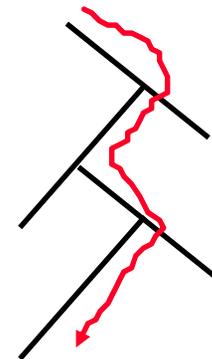
1	SD	0(R1), F4;	Stores M[i]
2	ADDD	F4, F0, F2;	Adds to M[i-1]
3	LD	F0, -16(R1);	loads M[i-2]
4	SUBI	R1, R1, #8	
5	BNEZ	R1, LOOP	



Trace Scheduling

Critical Path Scheduling

- Paralelismo através de **IF branches** vs. **LOOP branches**
- Dois passos:
 - *Seleção do Trace*
 - » Encontrar a(s) seqüência(s) de blocos básicos (*trace*) de maior seqüência de código (ou mais executada)
 - » Predição estática ou predição por profile
 - *Compactação do Trace*
 - » *Otimiza a execução deste código*
- *OBS.: muito usado para gerar código VLIW*



Suporte para Paralelismo

- Suporte de Software para ILP é bom quando o código é previsível em tempo de compilação.
- E se não for possível essa predição?
- Técnicas de Hardware tem que ser usadas:
 - Instruções Condicionais ou predicadas
 - Especulação em Hardware

Uso de Instruções Predicadas (Hardware e Compilador)

Suponha o seguinte código:

```
if ( VarA == 0 )  
    VarS = VarT;
```

Código tradicional:

```
LD      R1, VarA  
BNEZ   R1, Label  
LD      R2, VarT  
SD      VarS, R2
```

Label:

Método predicado (próx.): 

```
LD      R1, VarA  
LD      R2, VarT  
CMPNNZ R1, #0  
SD      VarS, R2
```

Label:

Método predicado (instr.): 

```
LD      R1, VarA  
LD      R2, VarT  
CMOVZ  VarS, R2, R1
```

Uso de Especulação (Hardware e Compilador)

- Aumentando o paralelismo:
 - A idéia é mover a execução de uma instrução através de um branch aumentando assim o tamanho do bloco básico e conseqüentemente o paralelismo.
 - Primeira dificuldade é evitar exceções. Por exemplo `if (a ^= 0) c = b/a;` pode causar uma divisão por zero em alguns casos.
 - Métodos para aumentar a especulação incluem:
 1. Uso de um conjunto de bits de status associados com os registradores. São um sinal que os resultados das instruções são inválidos até um certo momento.
 2. O resultado da instrução não pode ser escrito até se ter certeza que a instrução não é mais especulativa.

Uso de Especulação (Hardware e Compilador)

Suponha o seguinte código:

```
if ( A == 0 )
```

```
    A = B;
```

```
else
```

```
    A = A + 4;
```

E assumamos que A está em O(R3) e B em O(R2)

Código original:

LW	R1, 0(R3)	Load A
BNEZ	R1, L1	Testa A
LW	R1, 0(R2)	Clausula If
J	L2	Pula Else
L1:ADDI	R1, R1, #4	Clausula Else
L2:SW	0(R3), R1	Store A

Código com especulação:

LW	R1, 0(R3)	Load A
LW	R14, 0(R2)	Especula Load B
BEQZ	R1, L3	Outro if Branch
ADDI	R14, R1, #4	Clausula Else
L3: SW	0(R3), R14	Non-Spec Store

Uso de Especulação (Hardware e Compilador)

Se no exemplo anterior o LW* produz uma exceção, então um bit de status é setado no registrador. Se uma das próximas instruções tenta usar o registrador, então uma exceção é gerada.

Código especulativo:

LW	R1, 0(R3)	Load A
LW*	R14, 0(R2)	Espec. Load B
BEQZ	R1, L3	Outro if Branch
ADDI	R14, R1, #4	Clausula Else
L3: SW	0(R3), R14	Não-Spec Store

Suporte em HW para Exceção

- Vários mecanismos garantem que a especulação realizada pelo compilador não viole o comportamento sob exceções. Por exemplo:
 - não gerar exceções em código predicado quando sua execução é anulada
 - Não gerar exceções em Prefetch

Suporte em HW para Especulação de Referências à Memória

- Para que o compilador seja capaz de mover **loads** através de **stores**, quando ele não está absolutamente certo de que esse movimento possa ser feito, instruções especiais que avaliam conflitos em endereços são necessárias e devem ser incluídas na arquitetura
 - A instrução especial é colocada na posição original do **load** e este é movido para antes dos **stores**
 - Quando o **load** especulativo é executado, o hardware salva o endereço do acesso à memória
 - Se um **store** subsequente escreve nesta posição de memória antes que a nova instrução avalie este endereço, então a especulação falha
 - Se somente instruções de **load** são especuladas, então isso é suficiente para refazer o **load** no ponto onde a nova instrução é executada

Vantagens da Speculação em HW (Tomasulo) vs. SW (VLIW)

- HW - Vantagens:

- **Memory disambiguation**: melhor em HW, uma vez que se conhece o endereço atual
- **Branch prediction** : melhor em HW, possui menos **overhead**
- HW mantém as exceções precisas
- O mesmo código funciona em diferentes implementações
- Menor código (evita muitos **nops**)

- SW - Vantagens:

- A janela de instruções analisada pode ser muito maior
- Menos hardware necessário a implementação dos VLIW
- Mais tipos de especulação podem ser implementados
- Especulação pode ser baseada em informações locais e globais

Superscalar

vs. VLIW

- Código menor
- Compatibilidade binária através de gerações do hardware

- Hardware mais simples para decodificação e **issuing** das instruções
- Não possui hardware para **Interlock** (o compilador avalia?)
- Mais registradores, porém hardware de acesso mais simples (múltiplos e independentes **register files**)

Problemas com os Primeiros VLIW

- Aumento no tamanho do código
 - Geração de operações seqüenciais suficientes requer **loop unrolling** ambicioso
 - Quando instruções VLIW não são preenchidas, tem-se unidades funcionais não usadas (ociosas)
- Operação em **lock-step**; sem deteção de hazard
 - Um **stall** em uma unidade funcional do pipeline causa um **stall** na entrada do processador, já que todas as unidades funcionais trabalham sincronizadas
 - O Compilador pode prever unidades funcionais, porém caches são difíceis de se prever
- Compatibilidade de código binário
 - VLIW puro => diferentes números de unidades funcionais e latências necessitam diferentes códigos

Intel/HP IA-64 "Explicitly Parallel Instruction Computer (EPIC)"

- **IA-64**: conjunto de instruções; EPIC define o tipo
 - EPIC = 2ª geração de VLIW?
- **Itanium™** é o nome da primeira implementação (2001)
 - Alto nível de paralelismo e pipeline profundo a 800 Mhz
 - 6-wide, 10-stage pipeline a 800Mhz em processo 0.18 μ
- **128 64-bit integer registers + 128 82-bit floating point registers**
 - Os **register files** não são separado por unidade funcional como nas versões antigas de VLIW
- Hardware para avaliação de dependências (**interlocks** => compatibilidade binária)
- Execução predicada (seleção de 1 de 64 **1-bit flags**) => 40% menos mispredictions?

IA-64 Registers

- Os registradores inteiros são configurados para acelerar chamadas de procedimento usando uma pilha de registradores
 - Mecanismo similar ao desenvolvido no processador RISC-I de Berkeley e usado na arquitetura SPARC.
 - Registradores 0-31 são sempre acessíveis pelos endereços 0-31
 - Registradores 32-128 são usados como pilha de registradores e cada procedimento é alocada em um conjunto de registradores (de 0 a 96)
 - Um novo registrador **stack frame** é criado para cada chamada de procedimento renomeando-se os registradores em hardware;
 - Um registrador especial chamado de **current frame pointer (CFP)** aponta para o conjunto de registradores que é usado pelo procedimento
- 8 **64-bit Branch registers** - usados para manter os endereços de destinos dos branches indiretos
- 64 **1-bit registers** de predição

IA-64 Registers

- Ambos os conjuntos de registradores, inteiros e ponto flutuante, suportam rotações de registradores para os registradores 32-128.
- Rotação de registradores foi projetada para facilitar a tarefa de alocação de registradores em **software pipelined loops**
- Quando combinado com predicação é possível evitar desrolamento e código separado de **prologo** e **epilogo** em um dado software pipelined loop
 - Torna o SW-pipelining usável para loops com um número menor de iterações

Intel/HP IA-64 "Explicitly Parallel Instruction Computer (EPIC)"

- **Instruction group**: uma seqüência de instruções consecutivas sem dependência de dados nos registradores
 - Todas as instruções do grupo podem ser executadas em paralelo, se existir hardware suficiente e se as dependências em memória são preservadas
 - Um **instruction group** pode ter um tamanho arbitrário, mas o compilador deve explicitamente indicar os limites entre dois **instruction group** colocando um **stop** entre as 2 instruções que pertencem a diferentes grupos
- As instruções IA-64 são codificadas em **bundles** de 128 bits.
 - cada bundle consiste de um campo template de 5-bit e 3 instruções, cada uma de 41 bits
- 3 Instruções em grupos de 128 bit; os 5 bits determinam se as instruções são dependentes ou independentes
 - Código menor que os antigos VLIW, maior que o x86/RISC

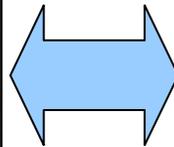
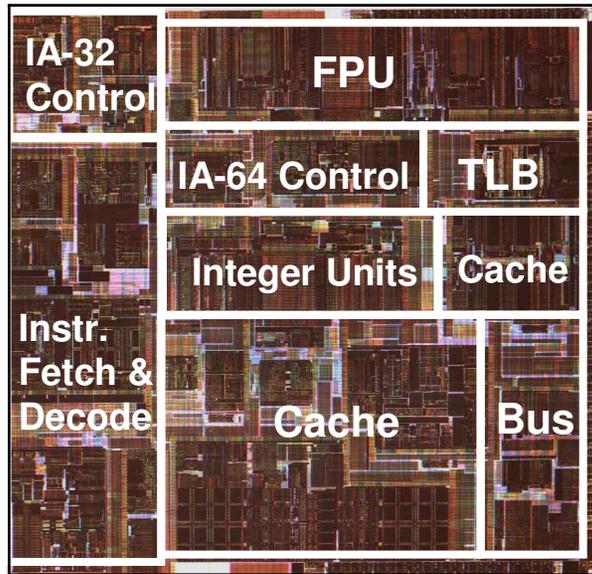
5 Tipos de Exeções em um Bundle

<i>Execution Unit Slot</i>	<i>Instruction type</i>	<i>Instruction Description</i>	<i>Example Instructions</i>
I-unit	A	Integer ALU	add, subtract, and, or, cmp
	I	Non-ALU Int	shifts, bit tests, moves
M-unit	A	Integer ALU	add, subtract, and, or, cmp
	M	Memory access	Loads, stores for int/FP regs
F-unit	F	Floating point	Floating point instructions
B-unit	B	Branches	Conditional branches, calls
L+X	L+X	Extended	Extended immediates, stops

- o campo de 5-bit em cada **bundle** descreve se há um **stop** associado com o **bundle** e o tipo da unidade de execução requerida por cada instrução no **bundle**

Itanium™ Processor Silicon

(Copyright: Intel at Hotchips '00)



Core Processor Die

4 x 1MB L3 cache

Itanium™ Machine Characteristics

(Copyright: Intel at Hotchips '00)

Frequency	800 MHz
Transistor Count	25.4M CPU; 295M L3
Process	0.18u CMOS, 6 metal layer
Package	Organic Land Grid Array
Machine Width	6 insts/clock (4 ALU/MM, 2 Ld/St, 2 FP, 3 Br)
Registers	14 ported 128 GR & 128 FR; 64 Predicates
Speculation	32 entry ALAT, Exception Deferral
Branch Prediction	Multilevel 4-stage Prediction Hierarchy
FP Compute Bandwidth	3.2 GFlops (DP/EP); 6.4 GFlops (SP)
Memory -> FP Bandwidth	4 DP (8 SP) operands/clock
Virtual Memory Support	64 entry ITLB, 32/96 2-level DTLB, VHPT
L2/L1 Cache	Dual ported 96K Unified & 16KD; 16KI
L2/L1 Latency	6 / 2 clocks
L3 Cache	4MB, 4-way s.a., BW of 12.8 GB/sec;
System Bus	2.1 GB/sec; 4-way Glueless MP Scalable to large (512+ proc) systems

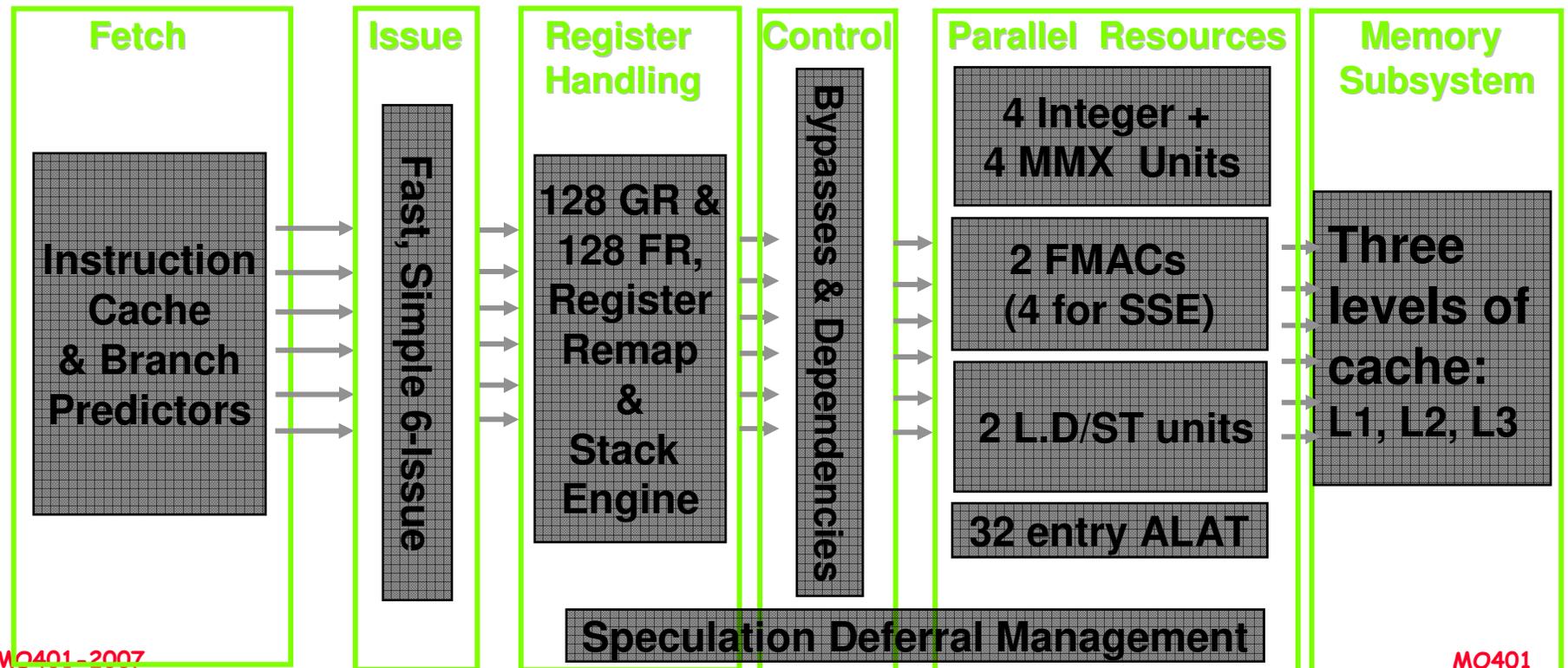
Itanium™ EPIC Design Maximizes SW-HW Synergy

(Copyright: Intel at Hotchips '00)

Architecture Features programmed by compiler:

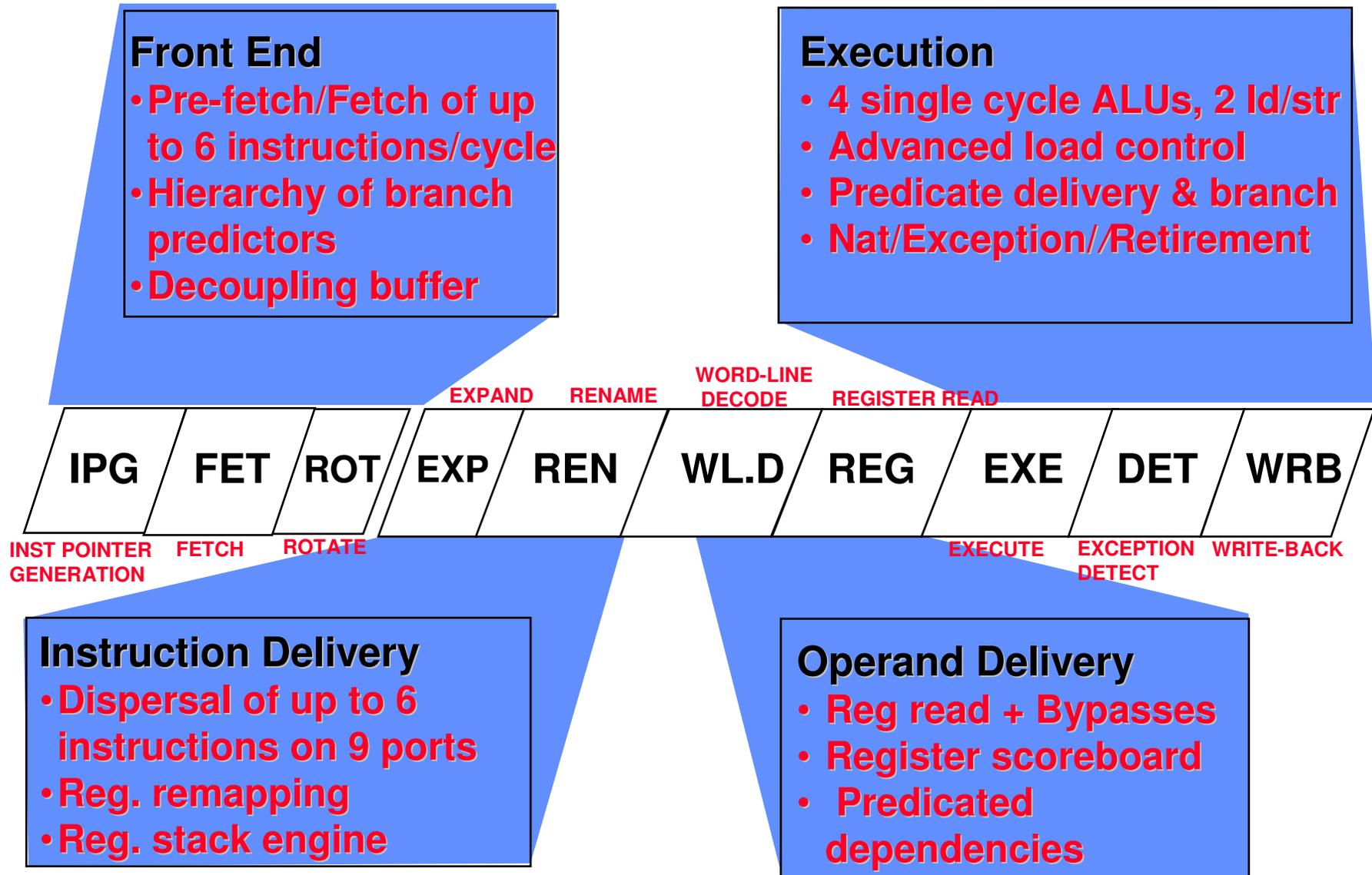
Branch Hints Explicit Parallelism Register Stack & Rotation Predication Data & Control Speculation Memory Hints

Micro-architecture Features in hardware:



10 Stage In-Order Core Pipeline

(Copyright: Intel at Hotchips '00)



Processador Itanium: pipeline de 10 estágios

- **Front-end** (estágios IPG, Fetch e Rotate):
prefetches até 32 bytes por clock (2 bundles) em um prefetch buffer, que pode manter até 8 bundles (24 instruções)
 - Branch prediction - realizado usando um **multilevel adaptive predictor**, como na micro-arquitetura P6
- **Instruction delivery** (estágios EXP e REN):
distribui até 6 instruções para as 9 unidades funcionais
 - Implementa **registers renaming**.

Processador Itanium: pipeline de 10 estágios

- **Operand delivery** (WLD and REG): acessa o register file, executa register bypassing, acessa e atualiza um register **scoreboard**, e avalia as dependências predicadas.
 - Scoreboard usado para detectar quando uma instrução individualmente pode continuar fazendo com que um stall de uma instrução em um bundle não precise parar todo o bundle
- **Execution** (EXE, DET, and WRB): executa as instruções nas ALUs e nas unidades de load/store, detecta exceções e posta NaTs, executa write-back
 - O tratamento de exceções para instruções especulativas é suportado provendo NaTs (Not a Thing), equivalentes aos **poison bits** para os GPRs (o que torna os GPRs registradores de 65 bits), e NaT Val (Not a Thing Value) para os FPRs (já com 82 bits)

Comentários sobre o Itanium

- O Itanium tem diversas características comumente associadas com **dynamically-scheduled pipelines**
 - Forte ênfase em **branch prediction**, **register renaming**, **scoreboarding**, pipeline profundo com muitos estágios antes da execução e vários estágios após a execução
 - Surpreende, para uma abordagem que a idéia principal é baseada na tecnologia de compiladores e HW simples, se ver um processador tão complexo quanto aqueles baseados em **dynamically scheduled!**