

# Realizzazioni software di modelli dataflow

## Lezione 04 di Sistemi dedicati

Docente: Giuseppe Scollo

Università di Catania  
Dipartimento di Matematica e Informatica  
Corso di Laurea Magistrale in Informatica, AA 2019-20

### Indice

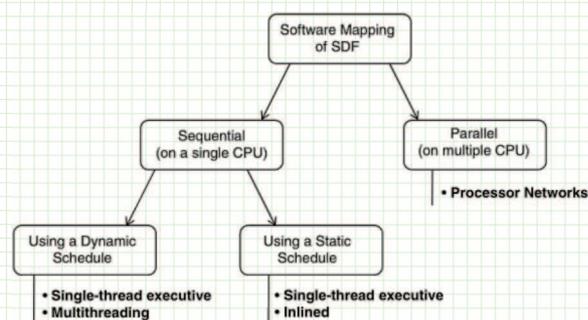
1. Realizzazioni software di modelli dataflow
2. argomenti della lezione
3. metodi di realizzazione software di modelli dataflow
4. realizzazione delle code FIFO
5. coda FIFO in C
6. realizzazione degli attori
7. esempio di attore in C
8. realizzazione software con scheduler dinamico
9. esempio: modello SDF di una FFT
10. realizzazione software del modello di FFT
11. scheduling dinamico con multithreading cooperativo
12. realizzazione con uso della libreria QuickThreads
13. ottimizzazione della realizzazione con scheduling statico
14. realizzazione inlined in C
15. riferimenti

di che si tratta:

- panoramica di metodi di realizzazione software di modelli dataflow
- realizzazione di code FIFO in C
- realizzazione di attori in C
- esempio: modello SDF di una FFT e sua realizzazione
- scheduling dinamico con multithreading cooperativo
- uso della libreria QuickThreads
- ottimizzazione della realizzazione con scheduling statico e inlining

metodi di realizzazione software di modelli dataflow

elementi del modello da tradurre in software: attori, code, regole di attivazione  
ampio spettro di opzioni di realizzazione:



Schaumont, Figure 3.1 - Overview of possible approaches to map dataflow into software

realizzazioni parallele, ottimizzazione dell'assegnamento di attori ai processori:

- bilanciamento del carico computazionale
- minimizzazione della comunicazione fra processori

realizzazioni sequenziali, opzioni: scheduling, threading

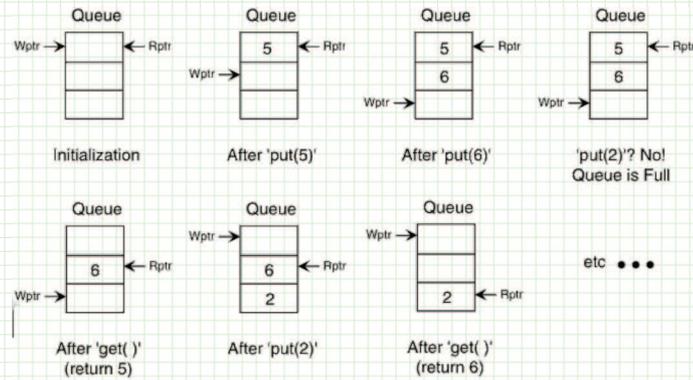
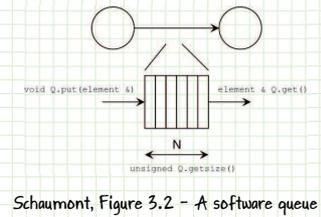
scheduling statico → ulteriori opportunità di ottimizzazione

## realizzazione delle code FIFO

coda FIFO, struttura con:

- due parametri: capacità, tipo di dato degli elementi
- tre operazioni: void put(element), element get(), int getsize()

si può realizzare mediante un array circolare e due puntatori alle locazioni di accesso per le operazioni di lettura e scrittura, incrementati mod N+1 se la dimensione dell'array è N+1, per una coda di capacità N



## coda FIFO in C

```
#define MAXFIFO 8
typedef struct fifo {
    int data[MAXFIFO]; // token storage
    unsigned wptr; // write pointer
    unsigned rptr; // read pointer
} fifo_t;

void init_fifo(fifo_t *F) {
    F->wptr = F->rptr = 0;
}

void put_fifo(fifo_t *F, int d) {
    if (((F->wptr + 1) % MAXFIFO) != F->rptr) {
        F->data[F->wptr] = d;
        F->wptr = (F->wptr + 1) % MAXFIFO;
    }
}

int get_fifo(fifo_t *F) {
    int r;
    if (F->rptr != F->wptr) {
        r = F->data[F->rptr];
        F->rptr = (F->rptr + 1) % MAXFIFO;
        return r;
    }
    return -1;
}

unsigned fifo_size(fifo_t *F) {
    if (F->wptr >= F->rptr)
        return F->wptr - F->rptr;
    else
        return MAXFIFO - (F->rptr - F->wptr);
}

int main() {
    fifo_t F1;
    init_fifo(&F1); // resets wptr, rptr;
    put_fifo(&F1, 5); // enter 5
    put_fifo(&F1, 6); // enter 6
    printf("%d %d\n", fifo_size(&F1), get_fifo(&F1));
    // prints: 2 5
    printf("%d\n", fifo_size(&F1)); // prints: 1
}

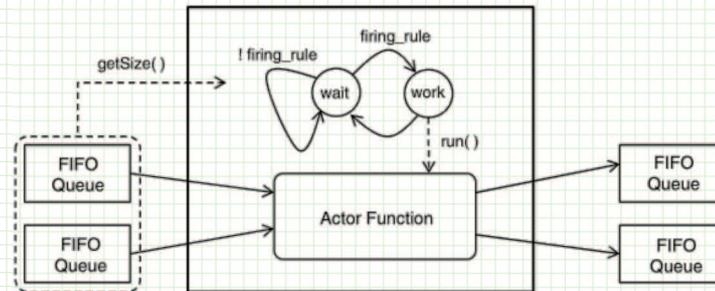
```

Schaumont, Listing 3.1 - FIFO object in C

una funzione  $C$ , parametrizzata con una struttura dati di supporto all'I/O sulle code FIFO

- l'I/O dell'attore è condizionato dalla validità della sua regola di attivazione
- presenza del numero richiesto di token in ciascuna delle sue code d'ingresso
- la validità delle regole di attivazione è controllata dall'attore a ogni sua invocazione

un primo esempio elementare di FSM con datapath (FSMD):



Schaumont, Figure 3.4 - Software implementation of the dataflow actor

### esempio di attore in C

una struttura dati di supporto per max. otto code d'ingresso e altrettante di uscita:

```
#define MAXIO 8
typedef struct actorio {
    fifo_t *in[MAXIO];
    fifo_t *out[MAXIO];
} actorio_t;
```

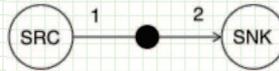
un attore che accetta due token interi e ne produce la somma e la differenza:

```
void fft2(actorio_t *g) {
    int a, b;
    if (fifo_size(g->in[0]) >= 2) {
        a = get_fifo(g->in[0]);
        b = get_fifo(g->in[0]);
        put_fifo(g->out[0], a+b);
        put_fifo(g->out[0], a-b);
    }
}
```

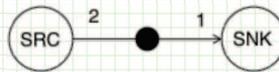
con questo schema, gli attori possono essere istanziati nel programma e invocati con scheduling dinamico

uno scheduler dinamico di sistema istanzia e inizializza attori e code, quindi invoca gli attori, per esempio a turno uno per volta:

```
void main() {
    fifo_t q1, q2;
    actorio_t fft2_io = {{&q1}, {&q2}};
    ..
    init_fifo(&q1);
    init_fifo(&q2);
    ..
    while (1) {
        fft2_actor(&fft2_io);
        // .. call other actors
    }
}
```



Schaumont, Figure 3.5a - A graph which will simulate under a single rate system schedule



Schaumont, Figure 3.5b - A graph which will cause extra tokens under a single rate schedule

schedule di sistema

```
void main() {
    ..
    while (1) {
        src_actor(&src_io);
        snk_actor(&snk_io);
    }
}
```

è evidente un problema con l'esempio nella seconda figura...

soluzione 1: adattare la schedule di sistema

```
void main() {
    ..
    while (1) {
        src_actor(&src_io);
        snk_actor(&snk_io);
        snk_actor(&snk_io);
    }
}
```

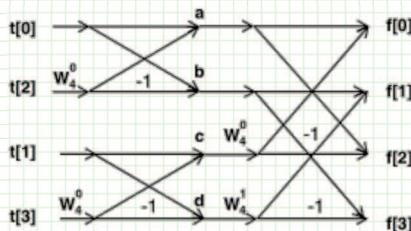
soluzione 2: adattare il codice dell'attore snk

```
void snk_actor(actorio_t *g) {
    int r1, r2;
    while ((fifo_size(g->in[0]) > 0)) {
        r1 = get_fifo(g->in[0]);
        ... // do processing
    }
}
```

esempio: modello SDF di una FFT

la trasformata rapida (discreta) di Fourier è molto usata nell'elaborazione di segnali

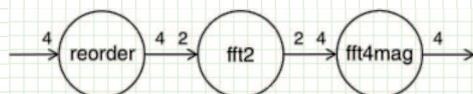
➤ fattori twiddle (radici complesse dell'unità):  $W_N^k = W(k, N) = e^{-j2\pi k/N}$



Schaumont, Figure 3.6a - Flow diagram for a four-point Fast Fourier Transform

$$\begin{aligned}
 a &= t[0] + W(0,4) * t[2] = t[0] + t[2] \\
 b &= t[0] - W(0,4) * t[2] = t[0] - t[2] \\
 c &= t[1] + W(0,4) * t[3] = t[1] + t[3] \\
 d &= t[1] - W(0,4) * t[3] = t[1] - t[3] \\
 f[0] &= a + W(0,4) * c = a + c \\
 f[1] &= b + W(1,4) * d = b - j.d \\
 f[2] &= a - W(0,4) * c = a - c \\
 f[3] &= b - W(1,4) * d = b + j.d
 \end{aligned}$$

un modello SDF per il calcolo delle ampiezze nel dominio della frequenza:



Schaumont, Figure 3.7 - Synchronous dataflow diagram for a four-point Fast Fourier Transform

- reorder : (t[0],t[1],t[2],t[3]) → (t[0],t[2],t[1],t[3])
- fft2 : l'attore in esempio a p. 7
- fft4mag : → ampiezze di 4 punti della trasformata

### realizzazione software del modello di FFT

```

void reorder(actorio_t *g) {
    int v0, v1, v2, v3;
    while (fifo_size(g->in[0]) >= 4) {
        v0 = get_fifo(g->in[0]);
        v1 = get_fifo(g->in[0]);
        v2 = get_fifo(g->in[0]);
        v3 = get_fifo(g->in[0]);
        put_fifo(g->out[0], v0);
        put_fifo(g->out[0], v2);
        put_fifo(g->out[0], v1);
        put_fifo(g->out[0], v3);
    }
}

void fft2(actorio_t *g) {
    int a, b;
    while (fifo_size(g->in[0]) >= 2) {
        a = get_fifo(g->in[0]);
        b = get_fifo(g->in[0]);
        put_fifo(g->out[0], a+b);
        put_fifo(g->out[0], a-b);
    }
}

void fft4mag(actorio_t *g) {
    int a, b, c, d;
    while (fifo_size(g->in[0]) >= 4) {
        a = get_fifo(g->in[0]);
        b = get_fifo(g->in[0]);
        c = get_fifo(g->in[0]);
        d = get_fifo(g->in[0]);
        put_fifo(g->out[0], (a+c)*(a+c));
        put_fifo(g->out[0], b*b - d*d);
        put_fifo(g->out[0], (a-c)*(a-c));
        put_fifo(g->out[0], b*b - d*d);
    }
}

int main() {
    fifo_t q1, q2, q3, q4;
    actorio_t reorder_io = {&q1, {&q2}};
    actorio_t fft2_io = {&q2, {&q3}};
    actorio_t fft4_io = {&q3, {&q4}};

    init_fifo(&q1);
    init_fifo(&q2);
    init_fifo(&q3);
    init_fifo(&q4);

    // test vector fft([1 1 1 1])
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 1);
    // test vector fft([1 1 1 0])
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 1);
    put_fifo(&q1, 0);

    while (1) {
        reorder(&reorder_io);
        fft2 (&fft2_io);
        fft4mag(&fft4_io);
    }
    return 0;
}

```

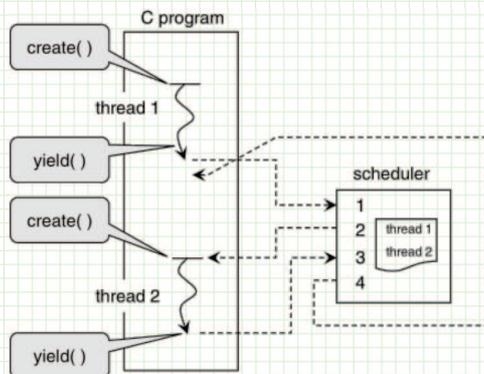
Schaumont, Listing 3.2 - 4-point FFT as an SDF system

### scheduling dinamico con multithreading cooperativo

con il multithreading si realizza lo scheduling dinamico assegnando a ciascun attore un proprio thread di esecuzione

multithreading cooperativo: rilascio del controllo e riattivazione dell'esecuzione dal punto in cui l'attore ha effettuato il rilascio

spesso: scheduler round-robin + soluzione 2 vista prima



### funzioni di libreria QuickThreads:

- stp\_init()
- stp\_create(stp\_userf\_t \*F, void \*G)
- stp\_start()
- stp\_yield()
- stp\_abort()

Schaumont, Figure 3.8 - Example of cooperative multi-threading

## realizzazione con uso della libreria QuickThreads

il rilascio del controllo con `stp_yield()` mantiene le variabili locali attraverso esecuzioni successive

```
#include "../qt/stp.h"
#include <stdio.h>
void hello(void *null) {
    int n = 3;
    while (n-- > 0) {
        printf("hello\n");
        stp_yield();
    }
}
void world(void *null) {
    int n = 5;
    while (n-- > 0) {
        printf("world\n");
        stp_yield();
    }
}
int main(int argc, char **argv) {
    stp_init();
    stp_create(hello, 0);
    stp_create(world, 0);
    stp_start();
    return 0;
}
```

l'applicazione di questa tecnica all'esempio sviluppato nel Listing 3.2 è molto semplice, e.g. per l'attore `fft2`:

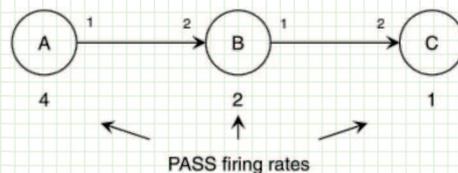
```
void fft2(actorio_t *g) {
    int a, b;
    while (1) {
        while (fifo_size(g->in[0]) >= 2) {
            a = get_fifo(g->in[0]);
            b = get_fifo(g->in[0]);
            put_fifo(g->out[0], a+b);
            put_fifo(g->out[0], a-b);
        }
        stp_yield();
    }
}
int main() {
    fifo_t q1, q2;
    actorio_t fft2_io = {{&q1}, {{&q2}}};
    ...
    stp_create(fft2, &fft2_io); // create thread
    ...
    stp_start(); // run the schedule
}
```

## ottimizzazione della realizzazione con scheduling statico

lo scheduling statico permette di ottimizzare una realizzazione software in tre aspetti:

- eliminazione del controllo delle condizioni di attivazione negli attori
- ottimizzazione della schedule minimizzando la capacità delle code FIFO
- *inlining* del software:
  - rimpiazzamento delle code con variabili → risparmio di spazio
  - eliminazione delle chiamate di funzione → risparmio di tempo

esempio:



```
while(1) {
    // call A four times
    A(); A(); A(); A();
    // call B two times
    B(); B();
    // call C one time
    C();
}
```

Schaumont, Figure 3.9 - System schedule for a multirate SDF graph

la schedule statica in figura è una PASS, tuttavia non è ottimale per la minimizzazione delle capacità delle code: lo è la sequenza di attivazione (A, A, B, A, A, B, C)

realizzazione inlined in C

realizzazione ottimizzata del modello di FFT4 a p. 9 con schedule statica e inlining:

```
void dfsystem(int in0, in1, in2, in3, *out0, *out1, *out2, *out3) {
    int reorder_out0, reorder_out1, reorder_out2, reorder_out3;
    int fft2_0_out0, fft2_0_out1, fft2_1_out0, fft2_1_out1;
    int fft4mag_out0, fft4mag_out1, fft4mag_out2, fft4mag_out3;

    reorder_out0 = in0;
    reorder_out1 = in2;
    reorder_out2 = in1;
    reorder_out3 = in3;

    fft2_0_out0 = reorder_out0 + reorder_out1;
    fft2_0_out1 = reorder_out0 - reorder_out1;
    fft2_1_out0 = reorder_out2 + reorder_out3;
    fft2_1_out1 = reorder_out2 - reorder_out3;

    out0 = fft4mag_out0 = (fft2_0_out0 + fft2_1_out0) * (fft2_0_out0 + fft2_1_out0);
    out1 = fft4mag_out1 = fft2_0_out1*fft2_0_out1 - fft2_1_out1*fft2_1_out1;
    out2 = fft4mag_out2 = (fft2_0_out0 - fft2_1_out0) * (fft2_0_out0 - fft2_1_out0);
    out3 = fft4mag_out3 = fft2_0_out1*fft2_0_out1 - fft2_1_out1*fft2_1_out1;
}
```

Schaumont, Listing 3.4 - Inlined data flow system for the four-point FFT

riferimenti

letture raccomandate:

Schaumont, Ch. 3, Sect. 3.1

per ulteriore consultazione:

Schaumont, Ch. 4