



Comunicazione tra processi

SCD

Anno accademico 2013/14
Sistemi Concorrenti e Distribuiti

Tullio Vardanega, tullio.vardanega@math.unipd.it

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova1 / 42



Comunicazione tra processi

Premesse – 1

- ❑ I processi di un sistema concorrente molto raramente sono indipendenti l'uno dall'altro
- ❑ La definizione delle interfacce tra le entità concorrenti di un sistema è fondamentale
 - Interfaccia ⇒ contratto ⇒ relazione formale
- ❑ Dobbiamo far riferimento a un modello di comunicazione tra entità

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova2 / 42



Comunicazione tra processi

Premesse – 2

- ❑ Un modello di comunicazione sceglie tra
 - Comunicazioni dirette tra entità attive
 - Comunicazioni indirette tra entità attive attraverso entità reattive condivise e di tipo passivo o protetto
- ❑ Forme classiche di comunicazione
 - Scambio messaggi → comunicazione diretta
 - Variabili condivise → comunicazione indiretta
 - Rischiosa se priva di agenti di controllo
 - Accesso non intrinsecamente atomico porta rischi all'integrità dei dati

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova3 / 42



Comunicazione tra processi

Variabili condivise – 1

- ❑ Condizione di Bernstein (IEEE TREC 15-5, 1966)
 - *Atomic execution is guaranteed if shared variables that are read and modified by a critical section are not modified by any other concurrently executing section of code*
 - La violazione di tale condizione da luogo al rischio di «data race»
 - R. Netzer e B. Miller (ACM LoPLAS 1-1, 1992) mostrano che verificarne la presenza in un programma è NP-hard

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova4 / 42



Comunicazione tra processi

Variabili condivise – 2

❑ Le zone di codice che effettuano azioni su variabili condivise sono dette «sezioni critiche»

❑ Si dice *race condition* la possibilità di accessi non ordinati a una risorsa condivisa

○ In generale il non-determinismo di esecuzione è qualità desiderabile di un programma concorrente!

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

5 / 42



Comunicazione tra processi

Variabili condivise – 2

❑ Vi sono quindi due problemi

1. Come rendere atomiche le sezioni critiche

• Algoritmo a livello applicazione, primitiva di sistema, ecc.

• Le *data race* a questo livello sono chiamate «*low-level*»

2. Come individuare bene le sezioni critiche

• Casi di *data race* a questo livello sono «*high-level*» e sono esposte a

• **Non-atomic protection fault** : quando uno di due processi che usa una risorsa condivisa la accede parzialmente più volte causando inconsistenza nell'effetto dell'operazione

• **Lost-update fault** : quando vi è dipendenza funzionale tra la lettura (atomica) di una variabile condivisa e la sua successiva scrittura (atomica e distinta) da parte di un processo in presenza di una scrittura concorrente atomica da parte di un altro processo

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

6 / 42



Comunicazione tra processi

Problema 1.a: esempio

```
/* il processo A deve accedere a X
Prima però deve verificarne
lo stato di libero */
if (lock == 0) {
    /* X è già in uso
    Occorre ritentare il test */
}
else {
    // X è libera, allora va bloccata
    lock = 0;
    <sezione critica S1 su X>;
    // e nuovamente liberata dopo l'uso
    lock = 1;
}
```

```
/* il processo B deve accedere a X
Prima però deve verificarne
lo stato di libero */
if (lock == 0) {
    /* X è già in uso
    Occorre ritentare il test */
}
else {
    // X è libera, allora va bloccata
    lock = 0;
    <sezione critica S2 su X>;
    // e nuovamente liberata dopo l'uso
    lock = 1;
}
```

Le sezioni critiche S1 e S2 sono sono atomiche

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

7 / 42



Comunicazione tra processi

Problema 1.b: esempio

```
/* DEPOSIT */
amount = read_amont();
lock(); /* primitiva ideale che
apre in modo atomico
la sezione critica */
balance = balance + amount;
interest = interest + rate *
balance;
unlock(); /* primitiva ideale che
rilascia la sezione
critica */
```

```
/* WITHDRAW */
amount = read_amount();
if (balance < amount) {
    /* notifica l'utente che
    l'operazione è negata */
}
else {
    balance = balance - amount;
    interest = interest +
rate * balance;
}
```

L'operazione Withdraw è esposta a *data race*

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

8 / 42

UniPD - SCD 2013/14 - Sistemi Concorrenti e Distribuiti

2



Comunicazione tra processi

Problema 2.a: esempio

```
/* Updater Task */
// set status value reading
synchronized (table){
    table[N].value = V;
}

... // do work

// set system status for value N
synchronized (table) {
    table[N].achieved = true;
}
```

```
/* Monitor Daemon */
synchronized (table){
    if (table[N].achieved &&
        system_state[N] !=
        table[N].value){
        // inconsistent system state
        issueWarning();
    }
}
```

NASA
Remote Agent (1997)
con Java e LISP

Non-atomic protection fault

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

9 / 42



Comunicazione tra processi

Problema 2.b: esempio

```
/* WITHDRAW */
void withdraw(int amount){
    lock(l);
    int tmp = balance;
    unlock(l);
    if tmp > amount{
        lock(l);
        balance = tmp - amount;
        unlock(l);
    }
}
```

```
/* DEPOSIT */
void deposit(int amount){
    lock(l);
    balance = balance + amount;
    unlock(l);
}
```

Lost-update fault

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

10 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 1

❑ Mutua esclusione – *exclusion*
synchronization

○ A ogni istante, non più di un processo può avere possesso di una risorsa condivisa

● Garanzia di atomicità

❑ Sincronizzazione condizionale – *avoidance*
synchronization

○ Certe condizioni logiche devono valere all'atto della sincronizzazione

● Problema classico: buffer finito condiviso nel modello produttore-consumatore

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

11 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 2

❑ L'uso di sincronizzazione espone a rischi

○ Non eliminabili a priori nel progetto di un linguaggio concorrente generale

○ Riconoscibili e risolvibili nel progetto del singolo sistema

❑ Stallo – *deadlock*

❑ Accodamento potenzialmente infinito – *lockout, starvation*

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

12 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 3

❑ Stallo (1/2)

○ Impedisce di proseguire a tutti i processi coinvolti

○ Richiede il verificarsi simultaneo di 4 pre-condizioni

1. Mutua esclusione
2. Accumulo di risorse (*hold-and-wait*)
3. Risorse non preilasciabili
4. Attesa circolare

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

13 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 4

❑ Stallo (2/2)

○ 4 strategie di trattamento del problema

1. **Indifferenza** : Sperare che il problema non si manifesti
2. **Prevenzione statica** : Accertare che progetto e realizzazione del sistema siano liberi da condizioni di rischio
3. **Prevenzione dinamica** : Analizzare lo stato di esecuzione presente e futuro del sistema per evitare che l'ingresso in condizione di stallo
4. **Rilevazione e trattamento** : Riconoscere il verificarsi del problema e utilizzare servizi speciali per ripristinare uno stato noto e sicuro

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

14 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 5

❑ Tecniche di prevenzione

○ Basta ☺ impedire il verificare di anche una sola delle 4 pre-condizioni (quale?)

- Alcune tecniche, sia statiche che dinamiche, impediscono l'accumulo di risorse ☹
- Altre tecniche, sia statiche che dinamiche, impediscono il formarsi di attese circolari ☺

❑ Tecniche di trattamento

○ *Transactional memory* : uso di meccanismi di «*concurrency control*» analoghi a quelle delle basi di dati

- Le transazioni aggiungono *consistency* e *isolation* ad atomicity

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

15 / 42



Comunicazione tra processi

Sincronizzazione – 5

❑ Accodamento potenzialmente infinito

○ Non si verifica in presenza di politica di accodamento FIFO

○ Si può verificare in presenza di qualunque altra politica

- A priorità (importanza, caratteristica statica)
- LIFO
- A urgenza (scadenza, caratteristica dinamica)

❑ La condizione di libertà da questo problema viene detta *fairness* (e garantisce *liveness*)

○ Tutti i processi hanno uguali opportunità di progredire

○ L'attesa attiva è incompatibile con la garanzia di *fairness*

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

16 / 42

UniPD - SCD 2013/14 - Sistemi Concorrenti e Distribuiti

4



Comunicazione tra processi

Requisiti generali

❑ A un linguaggio concorrente servono

○ Meccanismi per evitare o ridurre l'uso di attesa attiva

- In ambiente multi-processore si è costretti a usare «*spin-locking*» ☹

○ Forme di accodamento *fair* di processi

- Da usare per il supporto di comunicazione e sincronizzazione
- Se si può stimare a priori la massima di attesa in coda si parla di *bounded fairness*

❑ Ma la correttezza funzionale del programma non deve dipenderne!

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

17 / 42



Comunicazione tra processi

Requisiti di sincronizzazione

❑ Una modalità di sincronizzazione è ammissibile se soddisfa 4 condizioni

1. Garantire accesso esclusivo

2. Garantire attesa finita

3. Non fare assunzioni sull'ambiente di esecuzione

4. Non subire condizionamenti dai processi esterni alla sezione critica

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

18 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni “al limite” – 1

❑ Mutua esclusione con variabili condivise e alternanza stretta tra coppie di processi

○ Tre difetti importanti

- Uso di attesa attiva a.k.a. *busy wait*
- Violazione della condizione 4
- Rischio di *data race* sulla variabile di controllo (ma con effetti non gravi)

Processo 0 ::
while (TRUE) {
 while (turn != 0); /* busy wait */
 critical_region();
 turn = 1;
 outside_cr();
}

Processo 1 ::
while (TRUE) {
 while (turn != 1); /* busy wait */
 critical_region();
 turn = 0;
 outside_cr();
}

Comando di alternanza

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

19 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni “al limite” – 2

❑ Algoritmo di Dekker

```
var flag: array [0..1] of boolean;  
turn: 0..1;  
repeat  
  flag[i] := true;  
  while flag[j] do  
    if turn = j then  
      begin  
        flag[i] := false;  
        while turn /= i  
          flag[i] := true;  
        do no-op;  
      end if;  
    end while;  
    critical_section  
    turn := j;  
    flag[i] := false;  
  remainder_section  
until false;
```

Attesa attiva!

Algoritmo concepito da T.J. Dekker e applicato alle sezioni critiche da E.W. Dijkstra:
flag[i] ← True indica l'intenzione di **i** di entrare in sezione critica; il valore di **turn** arbitra l'accesso tra i processi.
Algoritmo pensato per 2 processi. Si può generalizzare a N>2 processi.

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

20 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni “al limite” – 3

❑ Algoritmo di Peterson

- Applica a coppie di processi
- Ogni processo opera su un **flag privato** e una **variabile condivisa**
 - Robusto rispetto alla *data race* sul valore della variabile condivisa ma solo in assenza di *cache* !
- Libero da *deadlock*
- Garantisce *bounded fairness*
 - La prenotazione della sezione critica da parte del processo A da priorità al processo B

```
set my.flag
give coin to other
loop
  if (other.flag clear) continue
  if (coin is mine) continue
end loop
// CRITICAL SECTION
clear my.flag
```

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

21 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni canoniche – 1

❑ Mutua esclusione mediante semafori

- Le operazioni sul semaforo devono essere indivisibili
 - $V(S) ::= S.Sem := S.Sem + 1;$
 - $P(S) ::= \text{if } S.Sem = 0 \text{ then Wait_til}(S.Sem > 0); \text{fi}; S.Sem := S.Sem - 1;$
 - Con $S.Sem = 1$ come valore iniziale si ha mutua esclusione
 - Con $S.Sem = N > 0$ inizialmente si realizza un **semaforo contatore** dove N è il massimo grado di concorrenza interna consentito dalla risorsa
 - Con $S.Sem = 0$ iniziale si ha rudimentale sincronizzazione condizionale
- All'attesa sul semaforo deve corrispondere accodamento del processo fino alla condizione (**Wait_til**) di rilascio
- Troppo dipendente dalla disciplina del programmatore!

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

22 / 42



Comunicazione tra processi

Un problema classico

❑ I filosofi a cena

- Specifica del problema: N filosofi sono seduti a un tavolo circolare. Ciascuno ha davanti a se cibo (spaghetti?) in un piatto, e una posata alla propria destra. Ogni filosofo usa due posate per mangiare. L'attività di ciascun filosofo alterna pasti a momenti di riflessione

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

23 / 42



Comunicazione tra processi

I filosofi a cena – 1

❑ Problemi progettuali di concorrenza

- Condivisione di risorse → le posate
- Mutua esclusione → pasto condizionato al possesso esclusivo di 2 posate
- Scambio dati tra processi → informazioni su stato risorse
- Realizzazione delle risorse → posate come risorse passive, risorse protette oppure *server*
- Sincronizzazione condizionale → un filosofo non può mangiare fin quando non ha 2 posate
- Rischio di stallo → tutte le pre-condizioni soddisfatte

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

24 / 42

UniPD - SCD 2013/14 - Sistemi Concorrenti e Distribuiti

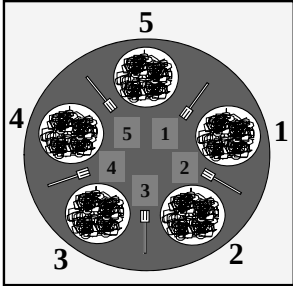
6



Comunicazione tra processi

I filosofi a cena – 2

□ Una non-soluzione



```
void filosofo_i(){
  while (True) {
    // medita
    prendi_forchetta(i);
    prendi_forchetta((i++)%5);
    // mangia
    posa_forchetta(i);
    posa_forchetta((i++)%5);
  }
}
```

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

25 / 42



Comunicazione tra processi

I filosofi a cena – 3

Soluzione con semafori, senza stallo

```
void filosofo_i(){
  while (True) {
    // medita
    P(mutex);
    P(f[i]);
    P(f[(i+1)%5]);
    V(mutex);
    // mangia
    V(f[i]);
    V(f[(i+1)%5]);
  }
}
```

Utilizziamo un semaforo per ogni forchetta (f[1..5]) e un semaforo per la mutua esclusione (mutex) al momento del prelievo delle forchette necessarie, così che più filosofi possano cenare simultaneamente

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

26 / 42



Comunicazione tra processi

Esercizio

□ Applicare al problema dei filosofi a cena una delle soluzioni “al limite”

- Usando un linguaggio a piacere
- Verificando il funzionamento e/o gli eventuali problemi della soluzione
 - Prima al caso di 2 processi e, poi, con più processi

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

27 / 42



Comunicazione tra processi

Esercizio

□ Dato il modello di soluzione senza stallo (diapositiva 26) indicare

- Pregi e difetti della soluzione illustrata
- Se esiste una soluzione che preveda l'utilizzo del solo semaforo mutex
 - Senza impiegare un semaforo per ciascuna posata
- Se il processo i possa impossessarsi del semaforo mutex trovando una delle due forchette a lui adiacenti occupate
 - Quali le conseguenze di tale eventualità?

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

28 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni canoniche – 2

❑ Mutua esclusione mediante *monitor*

○ Il *monitor* incapsula la risorsa condivisa e le sue operazioni quindi anche le sezione critiche corrispondenti

- 1974, Charles A R Hoare, "Monitors – An Operating System Structuring Concept", Communications of the ACM vol. 17, pp. 549-557 + Erratum in CACM vol. 18, p. 95

○ Risorsa e stato sono nascosti alla vista dei processi utente

○ Il *monitor* esercita controllo sull'esecuzione delle operazioni invocate dall'esterno

○ Il compilatore (e non il programmatore!) inserisce il codice necessario al controllo degli accessi

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

29 / 42



Comunicazione tra processi

Soluzioni canoniche – 3

❑ Sincronizzazione condizionale con *monitor*

○ Riesce a rappresentare e a controllare condizioni logiche di accesso più sofisticate della mutua esclusione

- Mediante variabile di condizione o segnale

○ Wait (*var_condizione*) → forza l'attesa del chiamante

○ Signal (*var_condizione*) → risveglia il processo in attesa

- Il segnale di risveglio (Signal) non ha memoria
- Va perso se nessuno lo recepisce cioè non ha effetti di risveglio se nessun processo è in attesa su quella condizione

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

30 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* - 1

```
monitor PC
condition non-vuoto, non-pieno;
integer contenuto;
procedure inserisci(prod : integer);
begin
  if contenuto = N then wait(non-pieno);
  <inserisci nel contenitore>;
  contenuto := contenuto + 1;
  if contenuto = 1 then signal(non-vuoto);
end;
function preleva : integer;
begin
  if contenuto = 0 then wait(non-vuoto);
  preleva := <preleva dal contenitore>;
  contenuto := contenuto - 1;
  if contenuto = N-1 then signal(non-pieno);
end;
contenuto := 0; // inizializzazione
end monitor;
```

```
procedure Produttore;
begin
  while true do
    begin
      prod := produci;
      PC.inserisci(prod);
    end;
  end;
```

```
procedure Consumatore;
begin
  while true do
    begin
      prod := PC.preleva;
      consuma(prod);
    end;
  end;
```

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

31 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* – 2

❑ Wait blocca il chiamante quando le condizioni logiche della risorsa non consentono di procedere

○ Contenitore pieno → produttore

○ Contenitore vuoto → consumatore

❑ Signal notifica il verificarsi della condizione attesa al primo processo bloccato, risvegliandolo

○ Il processo risvegliato compete per l'esecuzione con il chiamante di Signal

○ La convenzione più spesso usata è che Signal sia l'ultima azione eseguita in procedure di monitor (vero?)

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

32 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* – 4

- ❑ L’invocazione di Wait e Signal è per natura protetta con mutua esclusione
 - Questo esclude il rischio di *data race*
- ❑ Problema
 - Come ottenere *avoidance synchronization* fuori dal codice algoritmico delle procedure di monitor?

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

33 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* – 5

- ❑ Java approssima il monitor con metodi **synchronized** senza variabili di condizione
 - Attesa sull'intero oggetto e non sulla condizione ®
- ❑ **wait()** e **notify()** invocate all'interno di metodi **synchronized** evitano *data race*
 - **notify()** risveglia un qualsiasi processo in attesa sull'oggetto – per questo esiste **notifyAll()** !
 - L'esecuzione di **wait()** può venire interrotta

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

34 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* – 6

```
class monitor{
    private int cont = 0;
    public synchronized void inserisci(int prod){
        if (cont == N) blocca();
        <inserisci nel contenitore>;
        cont = cont + 1;
        if (cont == 1) [this.]notify();
    }
    public synchronized int preleva(){
        int prod;
        if (cont == 0) blocca();
        prod = <preleva dal contenitore>;
        cont = cont - 1;
        if (cont == N-1) [this.]notify();
        return prod;
    }
    private void blocca(){
        try{[this.]wait();
        } catch(InterruptedException exc) {};}
}
```

```
static final int N = <...>;
static monitor PC = new monitor();
// ...
PC.inserisci(prod); // produttore
// ...
prod = PC.preleva(); // consumatore
```

Attesa e notifica sono responsabilità del programmatore

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

35 / 42



Comunicazione tra processi

Esercizio

- ❑ Dato il funzionamento di **wait()** e **notify()** in Java si verifichi se
 - Il codice mostrato nel riquadro di diapositiva 36 emuli correttamente il funzionamento di un *monitor* nel caso di 1 produttore e 1 consumatore
 - Ciò si verifichi anche nel caso di produttori e consumatori multipli

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

36 / 42



Comunicazione tra processi

Il costrutto *monitor* – 7

- ❑ **Separa la sincronizzazione dalla condivisione di dati**
- ❑ **Non consente controllo dinamico sull'ordine degli accessi**
 - Chi arriva primo entra anche se poi si deve sospendere
- ❑ **Usa meccanismi programmatici (wait & signal) per la sincronizzazione condizionale**
 - Non c'è alternativa: si tratta di un problema funzionale!

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

37 / 42



Comunicazione tra processi

Scambio messaggi – 1

- ❑ **Comporta sincronizzazione solo nella sua variante sincrona**
 - Sincronizzazione = conoscenza dello stato dell'altro
 - Mittente M e destinatario D si attendono reciprocamente
 - Procedendo poi solo a scambio avvenuto
- ❑ **Nella forma asincrona M non attende D**
 - D non viene così a conoscere lo stato corrente di M

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

38 / 42



Comunicazione tra processi

Scambio messaggi – 2

- ❑ **M e D devono conoscersi per indirizzarsi?**
 - Nomi unici
 - Di processo; di casella postale; di porta; di canale
 - Tipo di messaggio (da intendere a destinazione)
- ❑ **Forma sincrona e nomi unici – *rendez-vous***
 - Processo A :: B ! Msg Processo B :: A ? Msg
 - In CSP questa forma di comunicazione è unidirezionale

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

39 / 42



Comunicazione tra processi

Scambio messaggi – 3

- ❑ **Una preconditione può essere preposta all'attesa di un [tipo di] messaggio**
 - Per Dijkstra i comandi di ricezione [alternativi] sono selettivi, non-deterministici e dotati di “guardia”
 - 1975, “Guarded Commands, Nondeterminacy, and Formal Derivation of Programs”, CACM, vol. 18(8), pp. 453-457
- ❑ **La “guardia” è una espressione Booleana**
 - Quando vera abilita l'esecuzione del comando associato

```
select
  Guard_1 => Statement_1;
or
  Guard_2 => Statement_2;
or
  Guard_N => Statement_N;
end select;
```

Quando più guardie sono vere simultaneamente ne viene scelta una non-deterministicamente

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

40 / 42



Comunicazione tra processi

Scambio messaggi – 4

- ❑ Lo scambio dati può essere bidirezionale senza richiedere 2 messaggi (A/R)
- ❑ Il destinatario D offre un “luogo di entrata” (*entry*) dove ricevere parametri in e restituire valori su parametri out
- ❑ M nomina D e il servizio (= canale) mentre per D non vale il viceversa
 - Asimmetria di denominazione

Guard =>
accept Service (in ... out ...) do
...
end;

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

41 / 42



Comunicazione tra processi

Scambio messaggi – 5

- ❑ Comunicazione sincrona e asincrona sono duali: dall’una si può ottenere l’altra
 - Sincrona → Asincrona
Introdurre un’entità intermedia tra M e D produce comunicazione asincrona
 - Al costo aggiuntivo dell’entità intermedia (minor costo se non attiva!)
 - Asincrona → Sincrona
Accoppiare Send (di conferma) a Receive dal lato D e Receive a Send dal lato M comporta sincronizzazione
 - Al costo di due comunicazioni

Laurea Magistrale in Informatica, Università di Padova

42 / 42