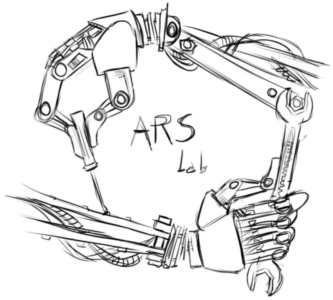
Aspetti Implementativi del Software dei Sistemi di Controllo

Corrado Santoro

ARSLAB - Autonomous and Robotic Systems Laboratory
Dipartimento di Matematica e Informatica - Università di Catania, Italy
santoro@dmi.unict.it



Programmazione Sistemi Robotici

Implementazione di un Sistema di Controllo

L'implementazione software di un sistema di controllo si basa sempre su un algoritmo caratterizzato dall'esecuzione di un **loop temporizzato** di un insieme attività:

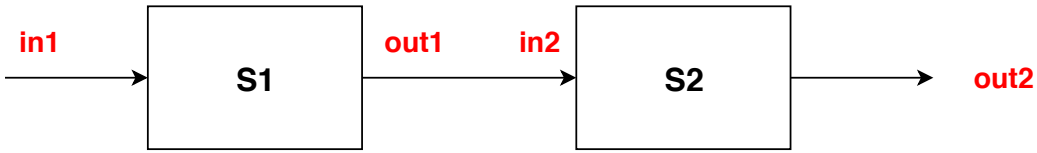
- Avvio delle attività sulla base di un **tempo di campionamento**, ΔT
- Lettura dell'ingresso del sistema di controllo
- Esecuzione dell'algoritmo di controllo specifico
- Invio dei risultati all'output

Algoritmo

while *True* **do**
    On each ΔT;
    $in \leftarrow read\_input()$;
    $out \leftarrow compute\_control()$;
    $write\_output(out)$;
end

Implementazione di un Sistema di Controllo

Qualora il sistema completo sia composto da diversi sotto-sistemi, in teoria, ognuno di essi dovrà essere implementato con un **loop (computazionale) differente** e i vari loop dovranno essere **eseguiti concorrentemente**



Sistema S1

while *True* **do**
    On each ΔT_1;
    $in1 \leftarrow read\_input1()$;
    $out1 \leftarrow compute\_S1()$;
    $write\_output1(out1)$;
end

Sistema S2

while *True* **do**
    On each ΔT_2;
    $in2 \leftarrow read\_input2()$;
    $out2 \leftarrow compute\_S2()$;
    $write\_output2(out2)$;
end

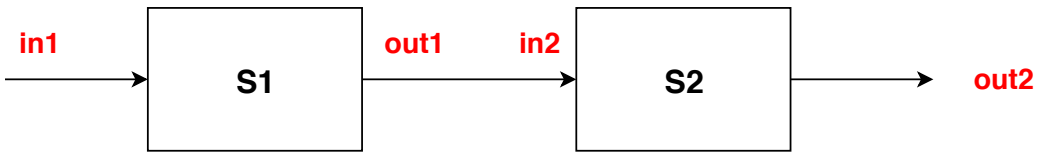
Poichè i sotto-sistemi sono interconnessi, occorrerà altresì implementare le opportune **forme di comunicazione** tra i “loop”: nel caso specifico la variabile $out1$ di $S1$ è anche l’input $in2$ di $S2$.

Implementazione di un Sistema di Controllo

Tuttavia se i tempi di campionamento coincidono $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T$, è possibile "fondere" i due loop:

Sistema S1+S2

while *True* **do**
    On each ΔT;
    $in1 \leftarrow read\_input1()$;
    $out1 \leftarrow compute\_S1()$;
    $in2 \leftarrow out1$;
    $out2 \leftarrow compute\_S2()$;
    $write\_output2(out2)$;
end

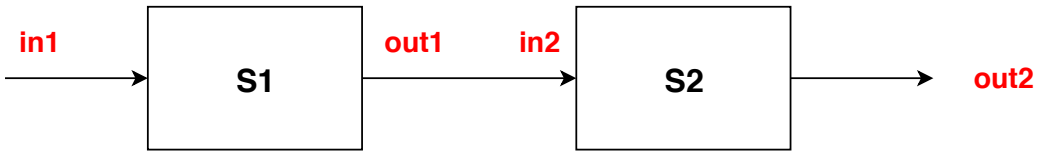


Implementazione di un Sistema di Controllo

Analogamente, qualora uno dei due intervalli sia **multiplo intero** dell'altro $\Delta T_1 = n\Delta T_2$, è possibile implementare il sistema come:

Sistema S1+S2

while *True* **do**
    On each ΔT_2;
    $count \leftarrow count + 1$;
    if $count = n$ **then**
        $count \leftarrow 0$;
        $in1 \leftarrow read\_input1()$;
        $out1 \leftarrow compute\_S1()$;
    end
    $in2 \leftarrow out1$;
    $out2 \leftarrow compute\_S2()$;
    $write\_output2(out2)$;
end



Scelta del Tempo di Campionamento

Serie di Fourier

Un qualunque segnale (periodico) $s(t)$ può essere rappresentato come una combinazione lineare di sinusoidi e cosinusoidi di coefficienti a_i e b_i:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N} [a_n \cos(\frac{2\pi}{T} nt) + b_n sin(\frac{2\pi}{T} nt)]$$

In altri termini, il segnale orginiario può essere ricostruito usando una **combinazione lineare di sinusoidi a frequenze diverse**.

Un segnale proveniente da un sensore può essere assimilato ad un segnale del tipo indicato.

Scelta del Tempo di Campionamento

Teorema del Campionamento

Un qualunque segnale (periodico) $s(t)$ può essere **ricostruito fedelmente** qualora venga campionato ad una frequenza f_{sample} e che sia **almeno due volte** la frequenza della sinusoide di frequenza massima

Tempo di Campionamento e Autovalori

- Il tempo di campionamento entra in gioco nella **discretizzazione** di un sistema, dove la matrice di stato A diventa, nel discreto:

$$A' = A\Delta T + I$$

- Poichè la stabilità ed il comportamento del sistema discretizzato dipendono dagli **autovalori** di A', è chiaro che ΔT gioca un ruolo fondamentale
- Concettualmente ΔT deve essere scelto in modo che (se x è il vettore di stato):

$$\frac{\Delta x}{\Delta T} \simeq 0$$

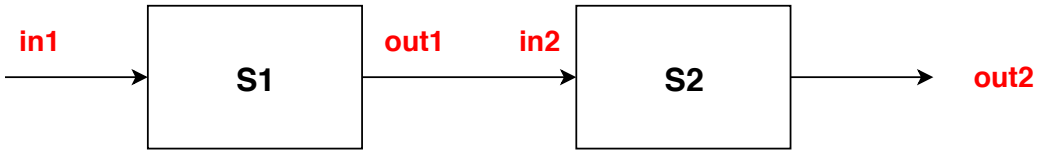
Suddivisione in Task

Suddivisione in Task

Organizzazione del software di un sistema di controllo

- Un insieme di **task** ognuno dei quali implementa un sotto-sistema
- Un ambiente di **scheduling** in grado di eseguire tali task con la loro **periodicità** (basa sul tempo di campionamento)
- Un ambiente di **comunicazione** tra task, al fine di consentire lo scambio dati e la sincronizzazione dei task stessi

Esempio: Task di Sistema di Controllo



Consideriamo il sistema in Figura e supponiamo che $S2$ sia campionato a ΔT, e $S1$ campionato a $4\Delta T$.

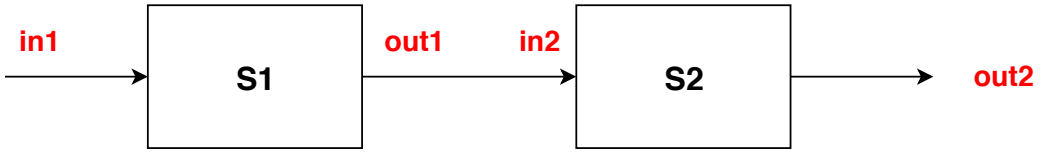
Task_S1()

$in1 \leftarrow read\_input1();$
$out1 \leftarrow compute\_S1();$
$write\_output1(out1);$

Task_S2()

$in2 \leftarrow read\_input2();$
$out2 \leftarrow compute\_S2();$
$write\_output2(out2);$

Esempio: Scheduling e Comunicazione di Sistema di Controllo



Consideriamo il sistema in Figura e supponiamo che $S2$ sia campionato a ΔT, e $S1$ campionato a $4\Delta T$.

Sistema S1+S2

```
while True do
    On each ΔT;
    count ← count + 1;
    if count = 4 then
        count ← 0;
        Task_S1();
        in2 ← out1;
    end
    Task_S2();
end
```

Componenti

- **Rosso:** Task
- **Verde:** Schedulatore
- **Blu:** Comunicazioni

Modellazione dei Task

Modello Strutturato

- Una **funzione** (corpo del task) che implementa il comportamento del sistema
- Una **struttura dati** che ingloba le informazioni di stato del task

Modello a Oggetti

- Una **classe** che rappresenta il sotto-sistema con...
- un **metodo principale** (es. `run()`) che implementa il comportamento del task
- Un **insieme di attributi** che inglobano le informazioni di stato del task

Gestione della Periodicità

Uso di un **timer hardware**, programmato con il periodo ΔT, alla cui scadenza viene attivata una procedura:

Soluzioni adottate

- Uso di una variabile condivisa (globale) in polling
- Procedura di *callback* associata al timer
- Invocazione di una procedura bloccante di *attesa* dell'evento di timer

In tutti i casi, sono necessarie un insieme di funzioni di libreria, o un sistema operativo, che supportino la gestione del timer nel modo specifico

Interrupt Service Routine + Polling di variabile condivisa

```
bool timer_elapsed ← false;

TimerISR () begin
    timer_elapsed ← true;
end

Main () begin
    while True do
        if timer_elapsed then
            timer_elapsed ← false;
            // Do the control tasks
        end
    end
end
```

Procedura di Callback associata al Timer

TimerCallback *()* **begin**

```
    // Do the control tasks
```

end

Main *()* **begin**

```
    SetTimerCallback(ΔT, TimerCallback);
    // ...  do other things
```

end

Chiamata bloccante di attesa evento di Timer

```
Main () begin
    SetupTimer(ΔT);
    while True do
        WaitTimerEvent();
        // Do the control tasks
    end
end
```

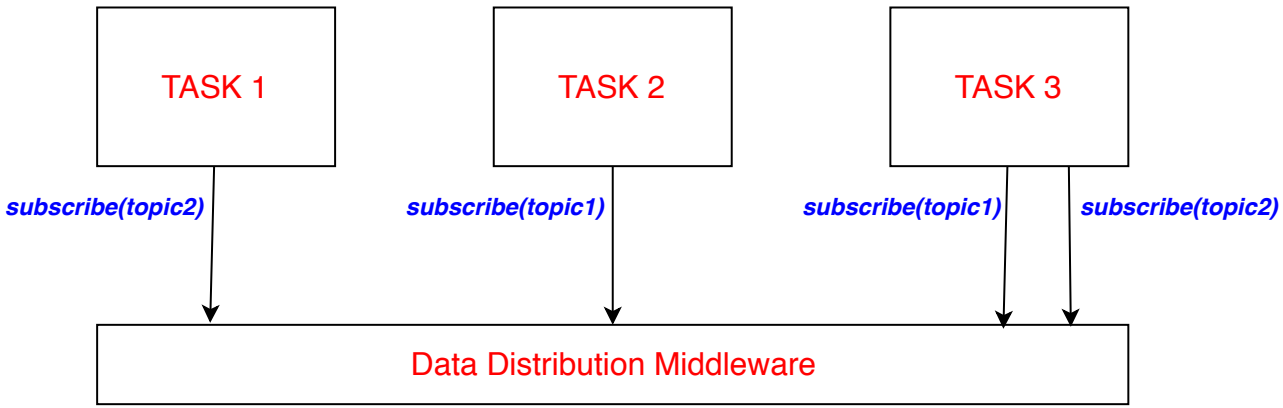
Comunicazione tra Task

Soluzioni adottate

- Uso di variabili globali, con sezioni critiche qualora l'accesso sia effettuato da task concorrenti
- Riferimenti tra oggetti (se il sistema è modellato a oggetti), con sezioni critiche qualora sia necessario
- **Uso di un middleware di comunicazione**

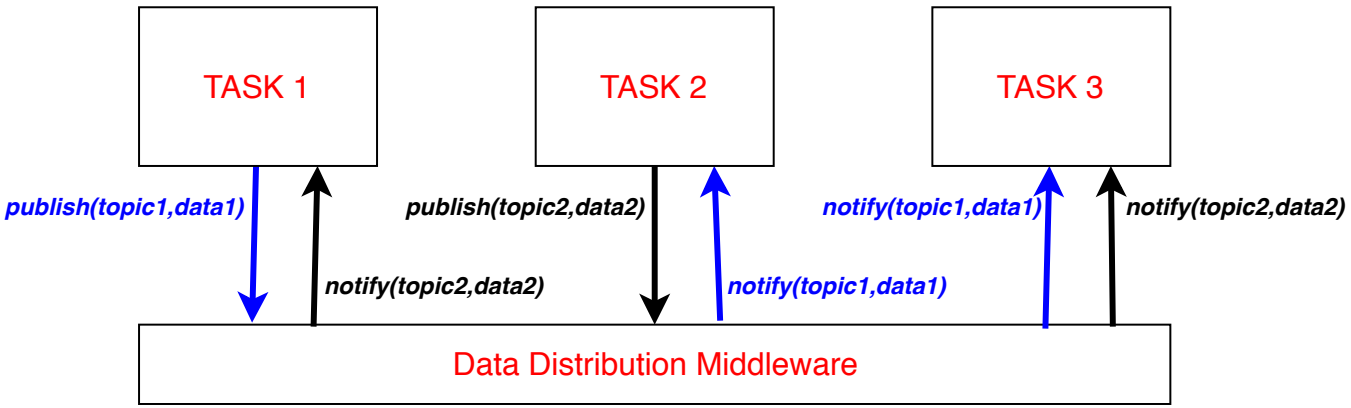
Modello Publisher/Subscriber (Data Distribution Model)

- I dati da scambiare sono modellati attraverso **tipi strutturati** e identificati da un **topic**
- I task interessati a un certo *topic* effettuano una chiamata di **subscribe** su quel topic specifico



Modello Publisher/Subscriber (Data Distribution Model)

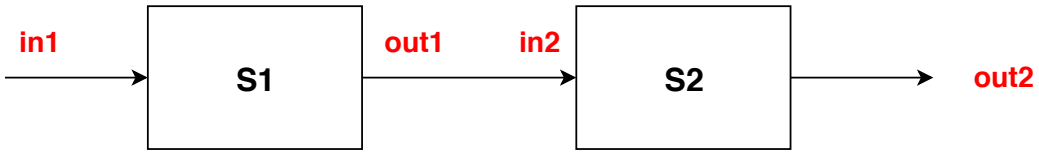
- I task che producono un dato con un certo *topic* effettuano una chiamata di **publish**, specificando topic e *dati*
- I task che si erano sottoscritti su quel topic riceveranno una **notify** con i dati che sono stati pubblicati



Alcuni Middleware di Comunicazione

- **uORB:** middleware di comunicazione per sistemi embedded (centralizzato)
- **CORBA-DDS (Data Distribution Service):** middleware di comunicazione basato sullo standard dell'Object Management Group (centralizzato e distribuito)
- **ROS (Robot Operating System:** middleware di comunicazione progettato appositamente per sistemi robotici (centralizzato e distribuito)

Sistema di Controllo con Modello Publisher/Subscriber



Task S1

while *True* **do**
    On each ΔT_1;
    *in*1 $\leftarrow$ *read_input*1();
    *out*1 $\leftarrow$ *compute_S*1();
    publish(" *mydata*" , *out*1);
end

Task S2

subscribe(" *mydata*");
while *True* **do**
    *in*2 $\leftarrow$ *wait_data*(" *mydata*");
    *out*2 $\leftarrow$ *compute_S*2();
    *write_output*2(*out*2);
end

Sistemi Operativi Real-Time

- L'esecuzione di task di controllo richiede **tempi certi**, altrimenti le conseguenze posso essere catastrofiche (soprattutto se il sistema è safety-critical)
- Se ΔT_c è il tempo di esecuzione "worst-case" di un task e ΔT il suo periodo, allora deve accadere che $\Delta T_c < \Delta T$
- Tuttavia il tempo rimanente $\Delta T - \Delta T_c$ deve essere tale da consentire al sistema di svolgere eventuali ulteriori attività

Vincolo di "Fattibilità"

- Vincolo di schedulazione possibile di N task periodici:

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{\Delta T_{c_i}}{\Delta T_i} < 1$$

dove ΔT_{c_i} è il **worst-case execution time** del task i e ΔT_i è il **periodo** del task i

Caratterische degli Schedulatori nei Sistemi Real-Time **Multi-task**

- La schedulazione multi-task è effettuata sulla base della **priorità** dei task
- La priorità **non cambia** sulla base del'uso recente del tempo di CPU, così come accade invece nei sistemi operativi "general-purpose"
- La **priorità** è invece assegnata (staticamente o dinamicamente) sulla base delle **caratteristiche temporali** del task stesso:
  - **RM** Rate Monotonic
  - **DM** Deadline Monotonic
  - **EDF** Earliest Deadline First

Politiche di Schedulazione nei Sistemi Real-Time

- **Round-Robin (RR) con Priorità:** Lo schedulatore sceglie il task con priorità più alta e lo manda in esecuzione, prelazionandolo al successivo “scheduling tick” (o se il task va autonomamente in “sleep” a seguito di una chiamata di sistema bloccante)
- **FIFO (con priorità):** Lo schedulatore sceglie il task con priorità più alta e lo manda in esecuzione; il task viene prelazionato solo se esso effettua esplicitamente una chiamata di sistema bloccante

Alcuni SO Real-Time

- **FreeRTOS.** Kernel real-time per sistemi embedded (open-source)
- **NuttX.** Kernel real-time per sistemi embedded (open-source, usato negli autopiloti dei droni)
- **RTAI.** Kernel Linux real-time (open-source)
- **QNX.** Kernel real-time Unix-like (proprietario)
- **VxWorks.** Kernel real-time Unix-like (proprietario)

Supporto per la Schedulazione Soft-Real-Time in Linux

System Call Linux per lo Scheduling

Impostazione politica di scheduling

```
int sched_setscheduler(pid_t pid, int policy,
                       struct sched_param * param);
```

- **pid**, l'identificatore del processo a cui si vuole cambiare la politica di scheduling (0 = "questo processo")
- **policy**, la politica di schedulazione: SCHED_OTHER, SCHED_RR, SCHED_FIFO
- **param**, i parametri aggiuntivi, tra cui la **priorità** (da 1 a 99)

Priorità

```
struct sched_param {
...
int sched_priority;
...
};
```

Esempio di Scheduling Custom

Un main che lancia 3 children

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include <sched.h>

int child_process(int id)
{
  ...
}

int main(int argc, char **argv)
{
    int i, status;
    printf("Starting 3 children...\n");

    for (i = 0; i < 3;i++) {
        pid_t pid = fork();
        if (pid == 0) {
            child_process(i);
            exit(0);
        }
    }

    printf("Waiting...\n");
    while (wait(&status) > 0) {};
    printf("End...\n");
}
```

Esempio di Scheduling Custom

```
int child_process(int id)
{
    struct sched_param params;
    int i,k;

#ifdef FIFO
    params.sched_priority = sched_get_priority_max(SCHED_FIFO);
    if (sched_setscheduler(0, SCHED_FIFO, &params) < 0) {
        perror("cannot set the scheduler");
    }
    printf("Setting priority %d\n", params.sched_priority);
#endif

#ifdef RR
    params.sched_priority = sched_get_priority_max(SCHED_RR);
    if (sched_setscheduler(0, SCHED_RR, &params) < 0) {
        perror("cannot set the scheduler");
    }
    printf("Setting priority %d\n", params.sched_priority);
#endif

    usleep(500000);
    printf("Child %d started\n", id);
    for (i = 0;i < 10;i++) { /* 10 iterazioni */
        printf("Child %d, iteration %d\n", id, i);
        for (k = 0; k < 100000000;k++) {} /* perdita di tempo ... */
    }
    return 0;
}
```

Esempio di Scheduling Custom

Test con SCHED_OTHER

```
$ taskset --cpu-list 1 sudo ./sched_test
Starting 3 children...
Waiting...
Child 2 started
Child 2, iteration 0
Child 1 started
Child 1, iteration 0
Child 0 started
Child 0, iteration 0
Child 1, iteration 1
Child 2, iteration 1
Child 0, iteration 1
Child 2, iteration 2
Child 0, iteration 2
Child 1, iteration 2
Child 2, iteration 3
Child 0, iteration 3
Child 1, iteration 3
Child 2, iteration 4
....
End...
```

Esempio di Scheduling Custom

Test con SCHED_FIFO

```
$ taskset --cpu-list 1 sudo ./sched_test
Starting 3 children...
Waiting...
Setting priority 99
Setting priority 99
Setting priority 99
Child 2 started
Child 2, iteration 0
Child 2, iteration 1
Child 2, iteration 2
...
Child 2, iteration 9
Child 1 started
Child 1, iteration 0
Child 1, iteration 1
Child 1, iteration 2
...
Child 1, iteration 9
Child 0 started
Child 0, iteration 0
Child 0, iteration 1
Child 0, iteration 2
...
Child 0, iteration 9
End...
```

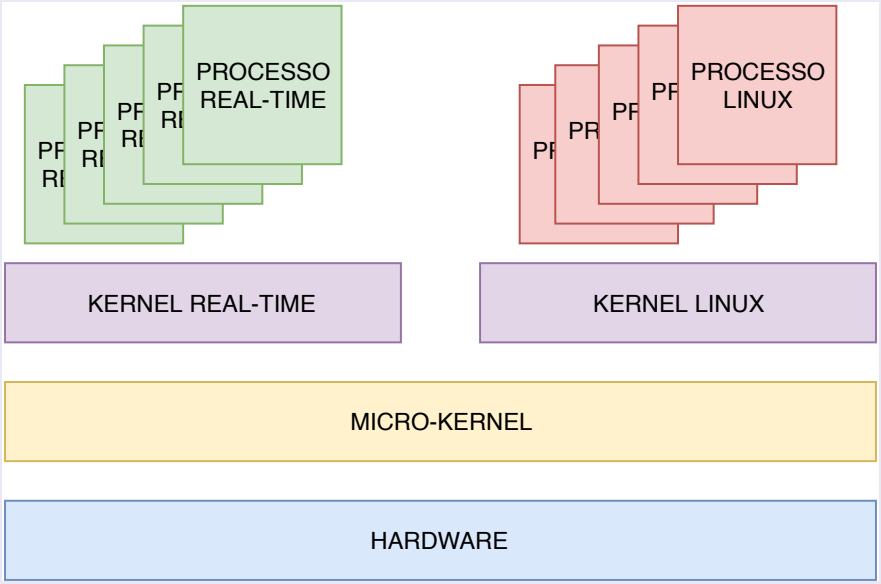
Real-Time Linux

Latenze & RTLinux

- Le politiche di schedulazione permettono l'implementazione di task soft real-time in Linux
- Occorre però considerare che parti di kernel Linux non sono pre-emptible e pertanto è possibile l'insorgenza di latenze non controllabili
- Ad esempio, la gestione della virtual memory introduce sicuramente latenze non predicibili
- **RTLinux** permette di superare questi limiti consentendo l'esecuzione di task hard-real time

RTAI

- RTAI è stato un pacchetto largamente usato per il supporto del real-time su Linux
- E' una patch al kernel (non-preemptible) che sfrutta il modello della virtualizzazione
- Il kernel di Linux è sostituito da un micro-kernel sul quale "operano" il kernel di Linux "classico" ed il kernel real-time (aggiunto da RTAI)



PREEMPT_RT Patch

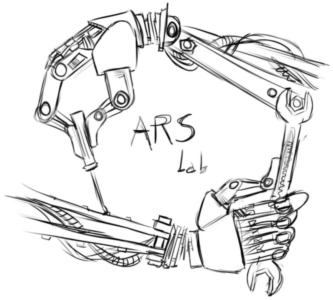
- Dalle versioni 3.0, il kernel Linux è stato reso preemptible attraverso una patch fornita dalla stessa Linux Foundation(*)
- Tale patch, oltre a introdurre la preemption, offre una serie di system call che permettono il supporto di task real-time:
  - Supporto timer e task timer-based
  - Politiche di scheduling
  - Controllo dello stack
  - Controllo della memoria

(*) = https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/start

Aspetti Implementativi del Software dei Sistemi di Controllo

Corrado Santoro

ARSLAB - Autonomous and Robotic Systems Laboratory
Dipartimento di Matematica e Informatica - Università di Catania, Italy
santoro@dmi.unict.it



Programmazione Sistemi Robotici