Introduzione a Contiki, Processi e Protothread, Eventi

Ing. Simone Brienza

E-mail: simone.brienza@for.unipi.it
Pervasive Computing & Networking Lab (PerLab) http://www.perlab.it
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa

Introduzione a Contiki

Wireless Sensor Networks

- Insiemi di nodi sensori,
  ossia dispositivi elettronici integrati, che comprendono:
  - Sensori (e attuatori)
  - Microcontrollore
  - Memoria limitata
  - Radio per comunicazioni wireless
  - Alimentazione (batterie)

- I nodi formano reti che trasmettono i dati misurati dai sensori ad una base station, in modo single-hop o multi-hop

Sistemi operativi per WSNs

- Il SO è l'interfaccia tra l'hardware e il programmatore
  - Nasconde molti dettagli implementativi
- Gestisce:
  - driver per la radio e i sensori
  - scheduling
  - gli stack di rete
  - i processi
  - power management
- Limitata interazione con l'utente
  - A causa dei vincoli di memoria e piattaforma (embedded)
- Esempi di SO per WSN:
  Contiki, TinyOS, LiteOS, Nano-RK, Mantis OS

Contiki: Caratteristiche

Contiki:

Un sistema operativo dinamico per sistemi embedded in rete

- Piccola impronta di memoria
- Kernel event-driven
- Progettato per la portabilità
  - Supporto per molte piattaforme (Tmote Sky, Zolertia, RedBee etc.)
- I programmi per Contiki sono scritti in C
- Usato sia nel mondo accademico che nell'industria
  - Cisco e Atmel fanno parte del *Contiki project*

Contiki: Funzioni principali

- Protothreads (Multithreading opzionale)
- uIP: stack TCP/IP per comunicazioni wireless low power
  - 6lowpan
  - IPV4 e IPv6 ready
- Allocazione dinamica della memoria
- Power profiling
- Dynamic loading e over-the-air programming
- IPsec, on-node database Antelope, Coffee file system, ...

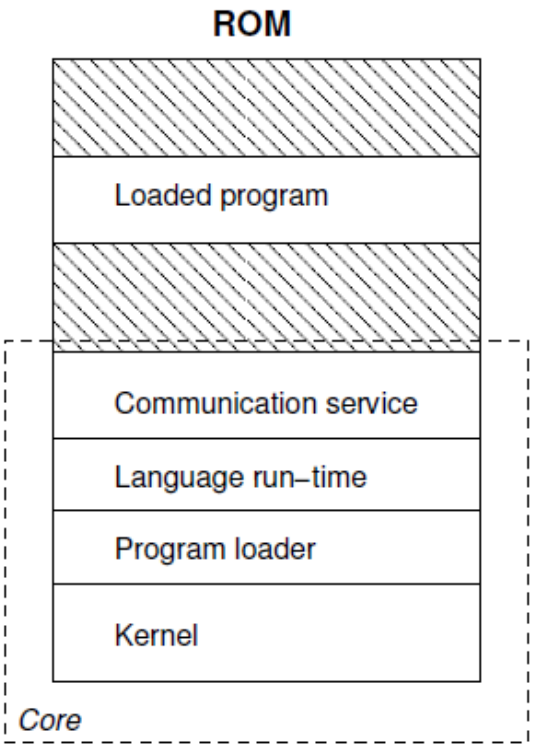
Contiki: System Overview (1/2)

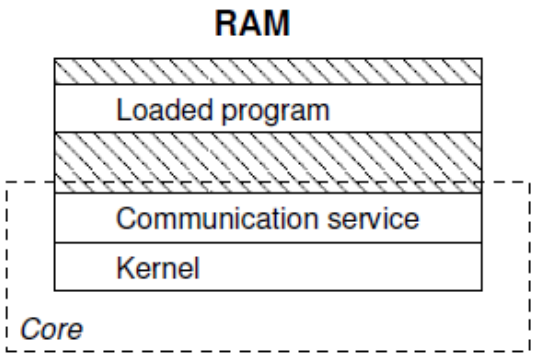
Un sistema **Contiki** in esecuzione consiste in:

- Kernel, in particolare uno scheduler (*event handler*)
  - Inter-process communication mediante eventi
- Librerie
- Program loader
- un insieme di processi
  - Servizi e applicazioni (caricabili anche dinamicamente)
- Bootloader per l'avvio di Contiki

Contiki: System Overview (2/2)

- Si distinguono due parti:
  - Core
  - Loaded programs
- Il codice è memorizzato nella ROM, i dati nella RAM
- Unico spazio di indirizzamento per tutti i processi





Contiki: Code size

Module	Code size (AVR)	Code size (MSP430)	RAM usage
Kernel	1044	810	$10 + 4e + 2p$
Service layer	128	110	0
Program loader	-	658	8
Multi-threading	678	582	$8 + s$
Timer library	90	60	0
Replicator stub	182	98	4
Replicator	1752	1558	200
Total	3874	3876	$230 + 4e + 2p + s$

Size of the compiled code, in bytes.

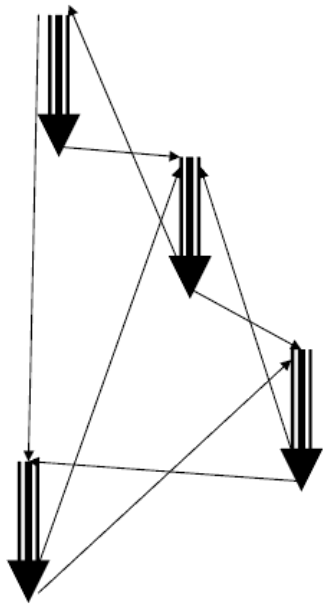
- *e* dimensione massima della coda degli eventi asincroni
- *p* numero massimo di processi per cui il sistema è stato configurato
- *s* dimensione degli stack dei thread (se il multithreading è abilitato)

Protothreads

Sistemi Event-driven

- programmi → insieme di *event handler*

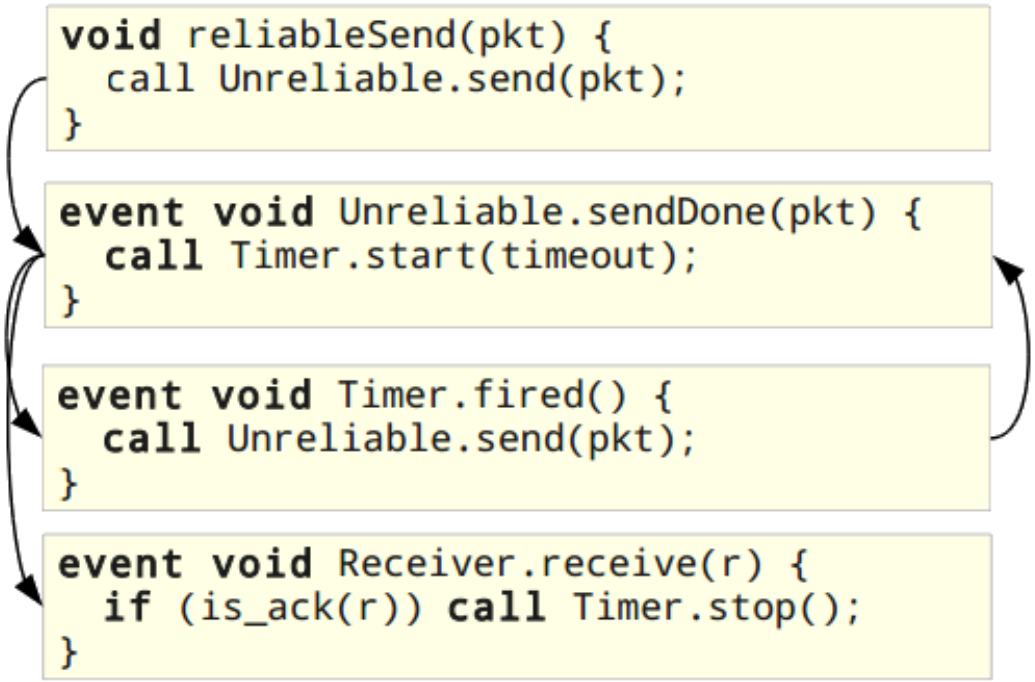
- gli *event handler* sono invocati in risposta ad eventi esterni:
  - sono delle subroutine: eseguono un'azione e ritornano al chiamante
  - semantica *run-to-completion*: non possono eseguire un'attesa bloccante



- difficoltà nel programmare operazioni di alto livello: macchine a stati

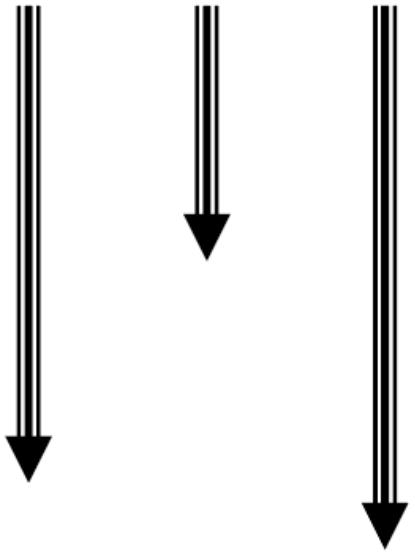
Sistemi Event-driven

- Problema: in un programma event-driven il *code flow* è complesso
- Esempio: stop-and-wait sender

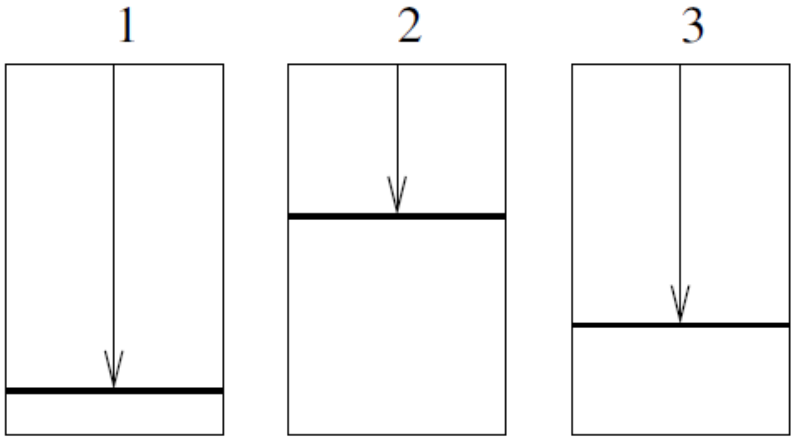


Sistemi Multi-threaded

- Code flow sequenziale e più intuitivo
- Possono bloccarsi in attesa che una condizione si avveri

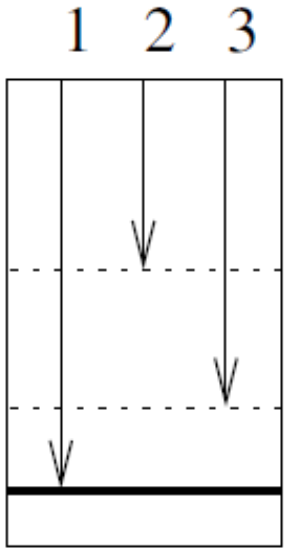


- Problema:
  ogni thread richiede il suo proprio stack



Protothread: Motivazioni

- Thread-style programming
  per sistemi con risorse limitate



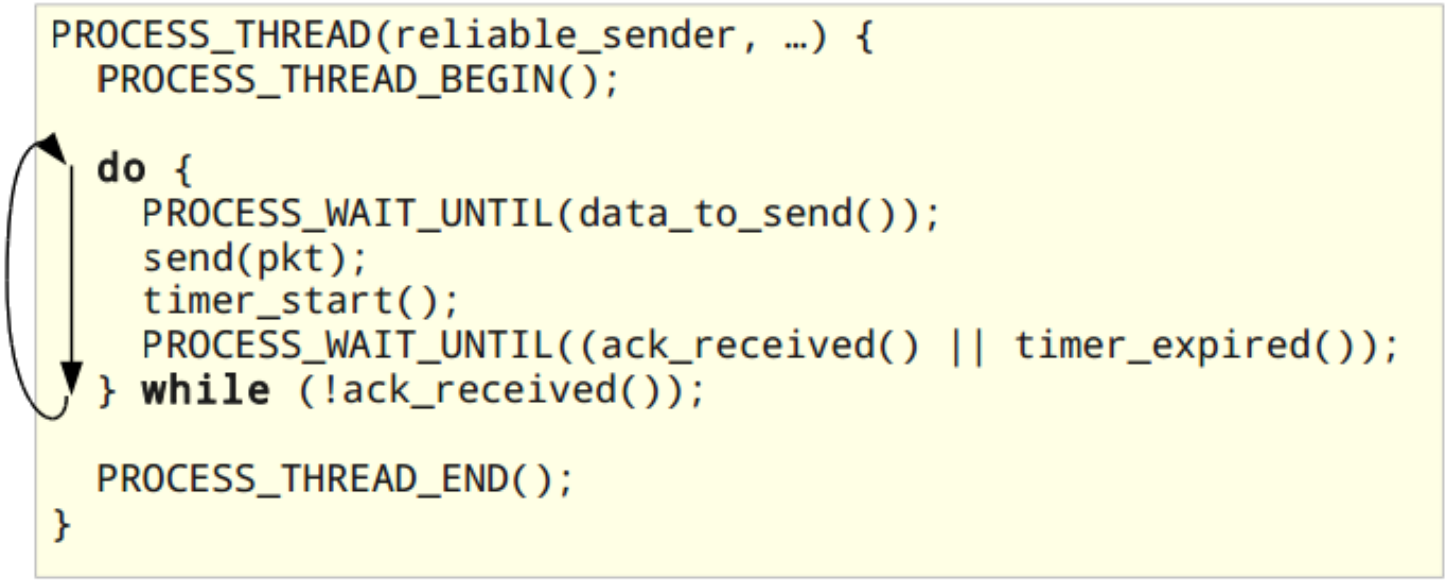
- Unico stack per tutti i protothread

- *Conditional blocking*,
  implementato al di sopra di un event-driven kernel

- si semplifica notevolmente la programmazione perché si può ridurre il numero di macchine a stati programmate esplicitamente

Protothread

- Esempio: stop-and-wait sender



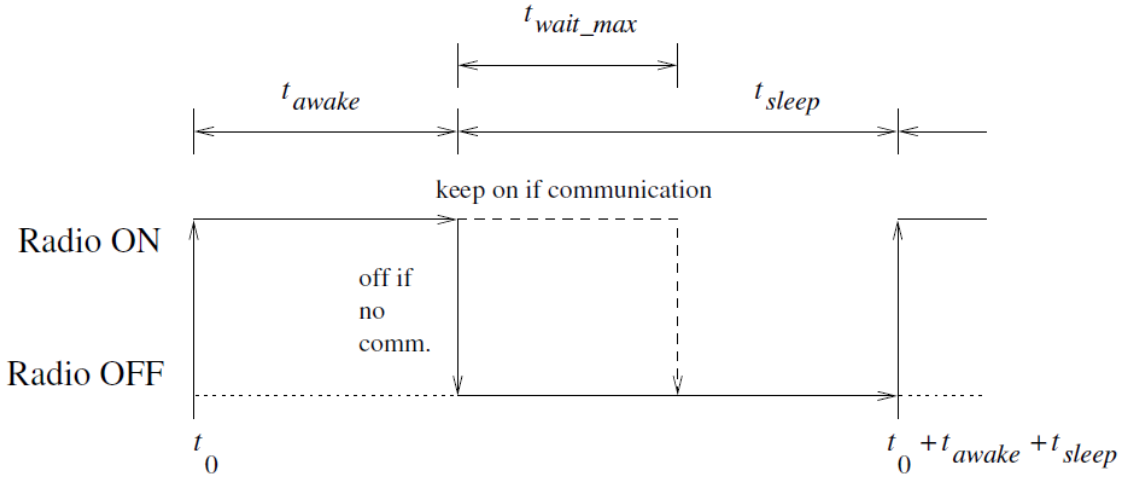
```
PROCESS_THREAD(reliable_sender, …) {
  PROCESS_THREAD_BEGIN();

  do {
    PROCESS_WAIT_UNTIL(data_to_send());
    send(pkt);
    timer_start();
    PROCESS_WAIT_UNTIL((ack_received() || timer_expired());
  } while (!ack_received());

  PROCESS_THREAD_END();
}
```

Esempio: MAC protocol (1/3)

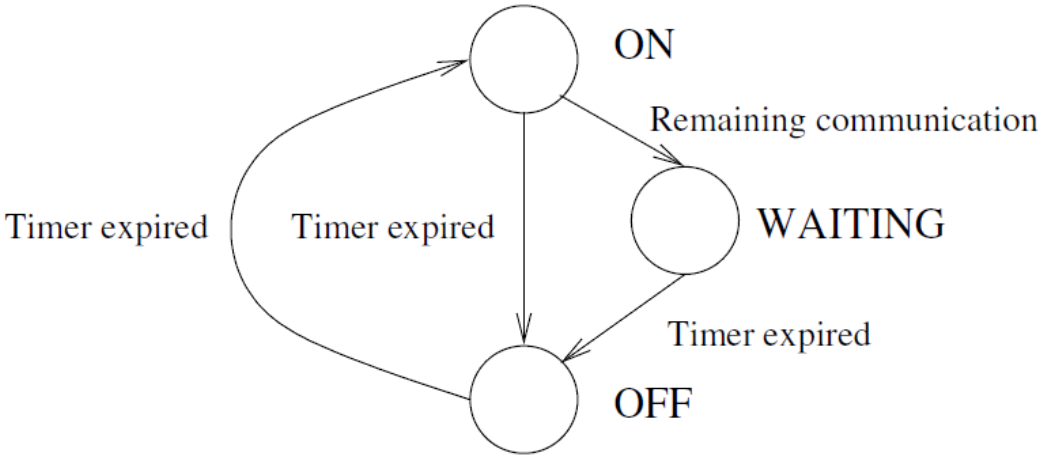
- Consideriamo un ipotetico MAC protocol:
  1. Accende la radio
  2. Aspetta un tempo $t = t_0 + t_{awake}$
  3. Spegne la radio, ma solo se la comunicazione è completata
  4. Se la comunicazione non è stata completata, aspetta che termini o aspetta un tempo $t = t_0 + t_{awake} + t_{wait\_max}$
  5. Spegne la radio. Aspetta un tempo $t = t_0 + t_{awake} + t_{sleep}$
  6. Ripete dal passo 1



Esempio: MAC protocol (2/3)

```
state: {ON, WAITING, OFF}

radio_wake_eventhandler:
  if (state = ON)
    if (expired(timer))
      timer ← t_sleep
      if (not communication_complete())
        state ← WAITING
        wait_timer ← t_wait_max
      else
        radio_off()
        state ← OFF
  elseif (state = WAITING)
    if (communication_complete() or
        expired(wait_timer))
      state ← OFF
      radio_off()
  elseif (state = OFF)
    if (expired(timer))
      radio_on()
      state ← ON
      timer ← t_awake
```



- **Macchina a stati finiti e implementazione con eventi**

Esempio: MAC protocol (3/3)

```
radio_wake_protothread:
  PT_BEGIN
  while (true)
    radio_on()
    timer ← t_awake
    PT_WAIT_UNTIL(expired(timer))
    timer ← t_sleep
    if (not communication_complete())
      wait_timer ← t_wait_max
      PT_WAIT_UNTIL(communication_complete() or
                    expired(wait_timer))
    radio_off()
    PT_WAIT_UNTIL(expired(timer))
  PT_END
```

- implementazione con protothread

Statement

- `PT_THREAD()` — *Dichiara un protothread.*
- `PT_INIT()` — *Inizializza il protothread.*
- `PT_BEGIN()` — *Dichiara l'inizio del protothread nella funzione che lo implementa.*
- `PT_END()` — *Dichiara la fine del protothread.*
- `PT_EXIT()` — *Esce dal protothread.*
- `PT_WAIT_UNTIL()` — *Aspetta il verificarsi di una certa condizione. Può essere bloccante.*
- `PT_YIELD()` — *Blocca il protothread incondizionatamente.*

  Continua alla successiva chiamata.
- `PT_SPAWN()` — *Un protothread può lanciare un protothread figlio che esegue un'altra funzione bloccante.*
  - *il padre si blocca fino a che il figlio non termina*
  - *il figlio è schedulato dal padre ogni volta che il padre viene chiamato*
  - *lo stato del figlio è memorizzato un una variabile locale del padre*

Continuazioni locali

- Quando un protothread si blocca, lo stato del protothread è memorizzato in una continuazione locale
- Lo stato è il punto attualmente in esecuzione della funzione che costituisce il protothread
- Lo stack non viene salvato
- 2 operazioni:
  - *set*: salva lo stato della funzione
  - *resume* : ristabilisce lo stato della continuazione precedentemente salvato dalla set

Implementazione C (1/3)

- Gli statement per i protothread sono implementati come **macro del preprocessore C**

```
struct pt { lc_t lc };
#define PT_WAITING 0
#define PT_EXITED  1
#define PT_ENDED   2
#define PT_INIT(pt)             LC_INIT(pt->lc)
#define PT_BEGIN(pt)            LC_RESUME(pt->lc)
#define PT_END(pt)              LC_END(pt->lc);     \
                                return PT_ENDED
#define PT_WAIT_UNTIL(pt, c)    LC_SET(pt->lc);     \
                                if(!(c))            \
                                  return PT_WAITING
#define PT_EXIT(pt)             return PT_EXITED
```

Implementazione C (2/3)

- Le continuazioni locali sono implementate utilizzando in modo non banale il costrutto switch

```
typedef unsigned short lc_t;
#define LC_INIT(c)   c = 0
#define LC_RESUME(c) switch(c) { case 0:
#define LC_SET(c)    c = __LINE__; case __LINE__:
#define LC_END(c)    }
```

Implementazione C (3/3)

- **Esempio di codice C espanso con continuazioni locali implementate tramite costrutto switch**

```
 1 int sender(pt) {
 2   PT_BEGIN(pt);
 3
 4   /* ... */
 5   do {
 6
 7     PT_WAIT_UNTIL(pt,
 8                   cond1);
 9
10   } while(cond);
11   /* ... */
12   PT_END(pt);
13
14 }
```

```
int sender(pt) {
  switch(pt->lc) {
  case 0:
    /* ... */
    do {
      pt->lc = 8;
  case 8:
      if(!cond1)
      return PT_WAITING;
    } while(cond);
    /* ... */
  }
  return PT_ENDED;
}
```

Protothread: Limitazioni

- le variabili locali automatiche non vengono salvate tra due chiamate successive!
  - è possibile usare variabili statiche o globali
- Il programmatore non può usare costrutti switch
- Possono chiamare funzioni ma non possono bloccarsi all'interno di una funzione chiamata
  - Deve essere generato un nuovo protothread per ogni funzione bloccante (protothread gerarchici)
- La sospensione è esplicita: il programmatore deve sapere quale funzione si può bloccare
- *Preemption* non possibile tra protothread

Processi

Processo

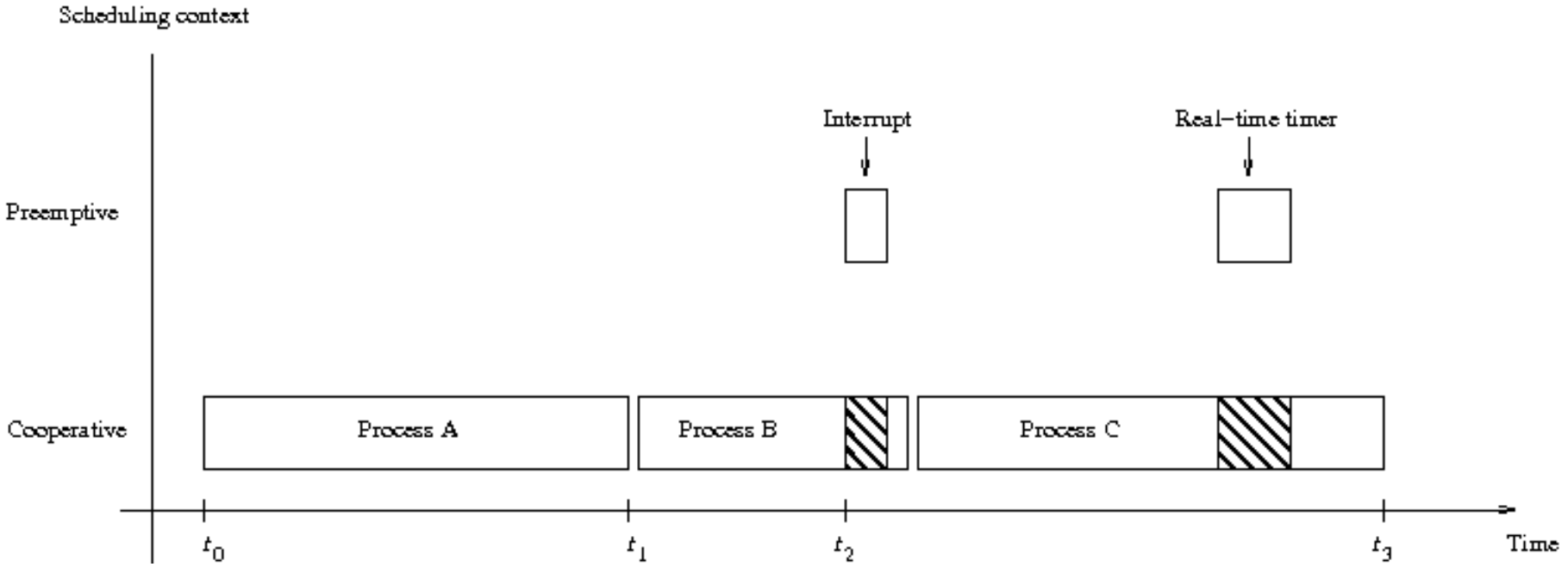
- Una sezione di codice eseguito da Contiki
- Avviato al boot del sistema o quando un modulo che contiene un processo è caricato nel sistema
- È eseguito in seguito ad un evento
  - l'invocazione dei processi avviene da parte di un apposito scheduler
- Consiste in 2 parti:
  - *Process control block*
  - *Process thread*

Contesti di esecuzione (1/2)

- 2 contesti di esecuzione:
  - Cooperativo: il codice è eseguito sequenzialmente rispetto ad altro codice cooperativo
    - ✓ I processi sono eseguiti sempre nel contesto cooperativo
    - ✓ Semantica *run-to-completion*
  - Preemptive: il codice può interrompere temporaneamente il codice cooperativo, in qualsiasi momento
    - ✓ Il codice cooperativo riprende al termine del codice preemptive
    - ✓ *Interrupt handlers* dei driver (hardware)
    - ✓ *Real-time task* schedulati entro una certa deadline (timer)

Contesti di esecuzione (2/2)

- Esempio dei due livelli di scheduling
  - Contiki non disabilita mai le interruzioni



Process Control Block

- Contiene informazioni sui processi in esecuzione
  - Memorizzato in RAM
  - Usato internamente dal kernel
  - Il codice utente non vi dovrebbe mai accedere

```
struct process {
    struct process *next;                    -> Prossimo PCB nella lista dei processi attivi
    const char *name;                        -> Nome testuale del processo
    int (* thread)(struct pt *,              -> Puntatore a funzione: punta al process thread
    process_event_t, process_data_t);           del processo
    struct pt pt;                            -> Tiene lo stato del protothread associato
    unsigned char state;                     -> Stato del processo
    unsigned char needspoll;                 -> Indica che il processo è stato polled
};
```

- Dichiarato con la macro *PROCESS(variabile_PCB, nome_processo)*
  - E.g.: `PROCESS (hello_world_process, «Hello world process»);`

Process Thread

- Contiene il codice del processo
- È un Protothread
  - Invocato dallo scheduler dei processi
- È definito tramite la macro *PROCESS_THREAD()*
  - *variable_PCB* la variabile associata al Process Control Block
  - *ev* identificatore dell'evento che ha causato l'invocazione del processo
  - *data* dati passati insieme all'evento `ev`

```
PROCESS_THREAD (hello_world_process, ev, data)
{
   PROCESS_BEGIN();
   printf(«Hello, world\n»);
   PROCESS_END();
};
```

Statement

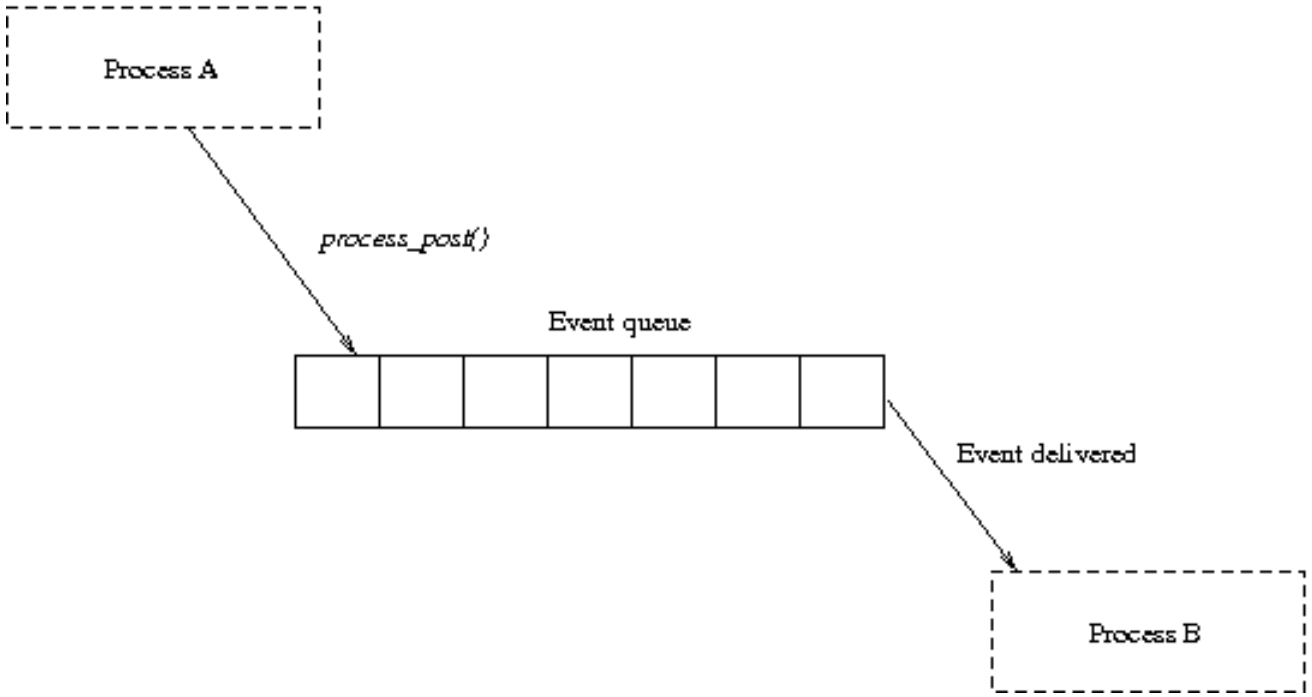
- Gli statement sono implementati mediante macro
  - Richiamano le macro dei protothread
  - In aggiunta, gestiscono il Process Control Block

- `PROCESS_BEGIN()` — *Dichiara l'inizio del protothread di un processo*
- `PROCESS_END()` — *Dichiara la fine del protothread del processo*
- `PROCESS_EXIT()` — *Chiude il processo*
- `PROCESS_WAIT_EVENT()` — *Aspetta per un evento qualsiasi*
- `PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL()` — *Aspetta per un evento, ma con una condizione*
- `PROCESS_YIELD()` — *Equivalente a* `PROCESS_WAIT_EVENT()`
- `PROCESS_WAIT_UNTIL()` — Aspetta per una data condizione. Può non essere bloccante
- `PROCESS_PAUSE()` — Mette temporaneamente in pausa il processo

Eventi

Eventi Asincroni (1/3)

- Quando un evento asincrono viene postato, l'evento è messo nella coda degli eventi del kernel e consegnato al processo destinatario dopo qualche tempo



Eventi Asincroni (2/3)

- È il kernel (scheduler) che si occupa di consegnare gli eventi
  - La gestione dell'evento è ritardata fino a quando il kernel (lo scheduler) non schedula il processo destinatario
- Il destinatario può essere
  - Uno specifico processo
  - Tutti i processi in esecuzione
    - ✓ Il kernel consegna lo stesso evento a tutti i processi, uno dopo l'altro
- Gli eventi asincroni sono postati con la funzione *process_post()*
  - Controlla che la coda degli eventi non sia piena
  - Aggiunge l'evento alla coda e ritorna
  - Il processo destinatario solitamente è bloccato su

```
PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL (ev == EVENTNAME);
```

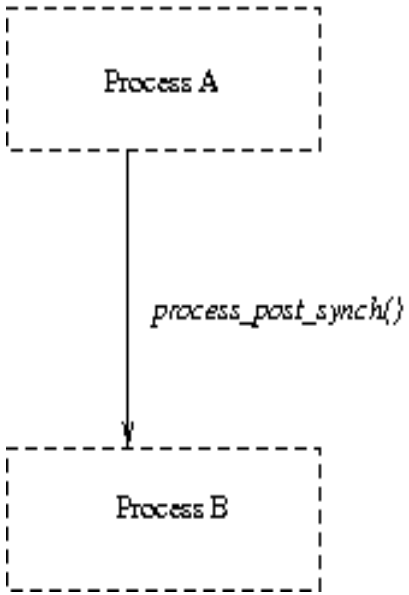
Eventi Asincroni (3/3)

```
int process_post   (struct process *p,
                    process_event_t ev,
                    void * data)
```

- Parametri:
  - *p* Il processo destinatario dell'evento. PROCESS_BROADCAST se deve essere postato a tutti i processi
  - *ev* L'evento da postare
  - *data* I dati aggiuntivi da inviare con l'evento
- Valori restituiti:
  - PROCESS_ERR_OK
    L'evento è stato correttamente inserito nella coda.
  - PROCESS_ERR_FULL
    La coda degli eventi era piena e l'evento non è stato postato.

Eventi Sincroni (1/2)

- Sono consegnati direttamente quando vengono postati
- Possono essere diretti solo ad uno specifico processo
- Postare un evento sincrono è funzionalmente equivalente ad una chiamata di funzione:
  - Il processo destinatario (B) è invocato direttamente dal processo mittente (A)
  - Il processo A si blocca finché il processo B non ha terminato di processare l'evento
- Gli eventi sincroni sono postati con la funzione *process_post_synch()*



Eventi Sincroni (2/2)

```
int process_post_synch   (struct process *p,
                          process_event_t   ev,
                          void * data)
```

- Parametri:
  - *p* Un puntatore al PCB del processo
  - *ev* L'evento da postare
  - *data* Un puntatore verso dati aggiuntivi da postare insieme con l'evento

Polling

- È un tipo speciale di evento
- Il processo che riceve un poll è schedulato il prima possibile
  - Inoltre riceve un evento di tipo PROCESS_EVENT_POLL
- È l'unico modo con cui è possibile chiamare un processo da un interrupt
- Un processo riceve un poll tramite la funzione *procces_poll()*
  - La funzione setta il flag *needspoll* nel PCB del processo

```
void process_poll (struct process *p)
```

- Parametri:
  - *p* Un puntatore al PCB del processo

Event Identifiers

- Gli eventi sono indicati con un identificatore:
  - Un numero intero su 8 bit
  - È passato al processo che riceve l'evento
- Gli eventi con identificatore...
  - < 128 possono essere usati all'interno di uno stesso processo
  - ≥ 128 sono usati tra processi distinti e sono gestiti dal kernel
- I primi numeri oltre il 128 sono allocati staticamente dal kernel

Event Identifiers: ID riservati

- `#define PROCESS_EVENT_NONE 128`
- `#define PROCESS_EVENT_INIT 129`

  Inviato ai nuovi processi quando sono inizializzati
- `#define PROCESS_EVENT_POLL 130`

  Inviato a un processo che ha ricevuto un poll
- `#define PROCESS_EVENT_EXIT 131`

  Inviato a un processo che sta per essere terminato dal kernel
- `#define PROCESS_EVENT_CONTINUE 133`

  Inviato a un processo in attesa su un PROCESS_YIELD()
- `#define PROCESS_EVENT_MSG 134`

  Inviato a un processo che ha ricevuto un messaggio (e.g. uIP)
- `#define PROCESS_EVENT_EXITED 135`

  Inviato a tutti i processi quando un altro processo sta per terminare
- `#define PROCESS_EVENT_TIMER 136`

  Inviato a un processo quando un timer evento è scattato

Eventi custom

- In aggiunta, i processi possono allocare identificatori sopra il 128 da usare per la comunicazione con altri processi

1. Si dichiara la variabile associata all'evento custom

```
static process_event_t evento_di_test;
```

2. Si alloca l'identificatore all'evento

```
evento_di_test = process_alloc_event();
```

3. L'evento può essere normalmente postato e ricevuto:
   e.g.

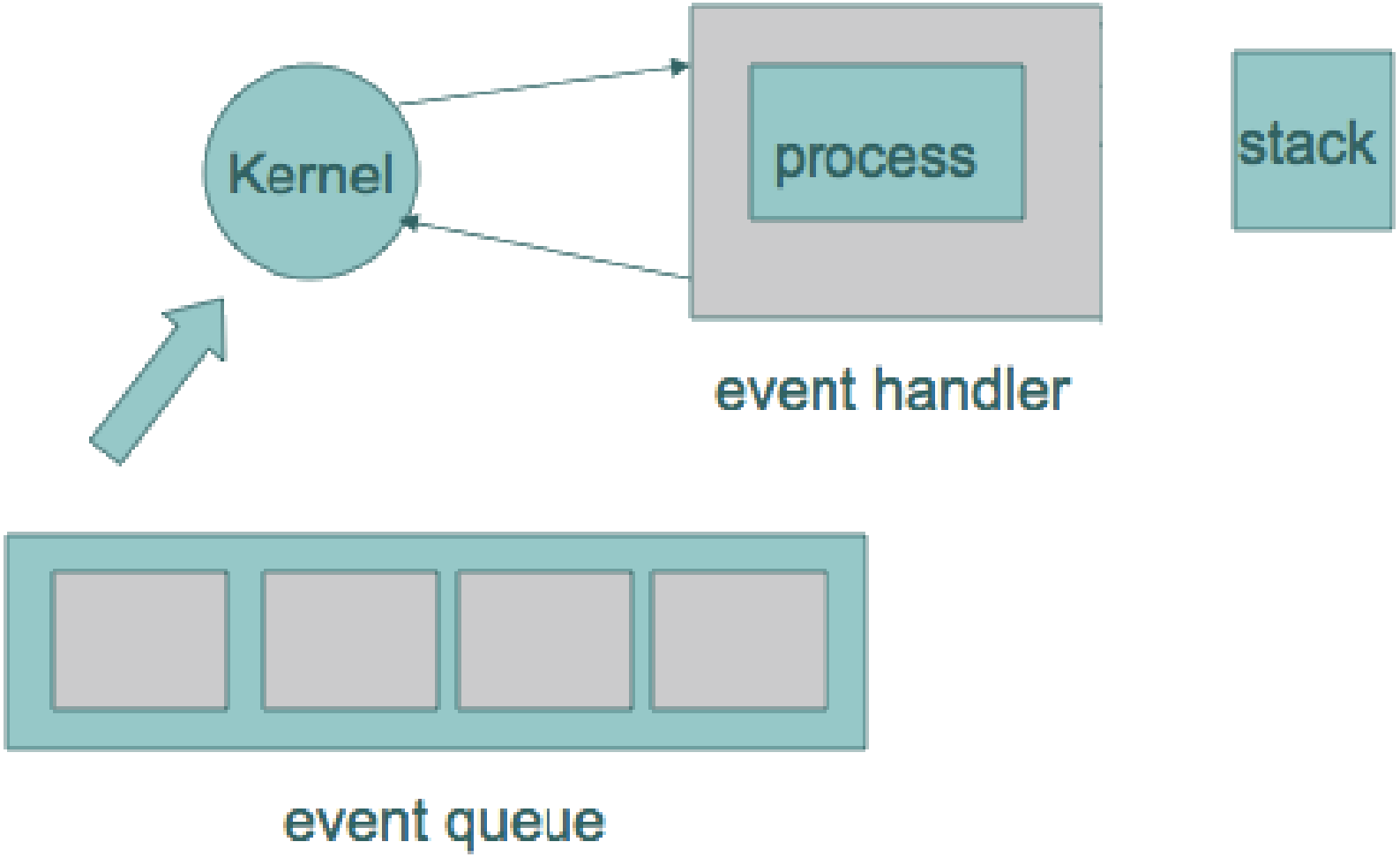
```
process_post(&process, evento_di_test, &data);
PROCESS_WAIT_EVENT_UNTIL(ev == evento_di_test );
```

Lo scheduler dei processi

Scheduler dei processi (1/2)

- Ha lo scopo di invocare i processi
  - Un Loop che prende un evento dalla coda degli eventi
  - Chiama il/i PROCESS_THREAD a cui l'evento è destinato
  - Se non c'è niente da fare, la CPU va in *sleep* (*MCU low power mode*)
- Ogni invocazione deriva da un evento
  - Eventi esterni (interrupt hardware)
  - Timer
  - Eventi postati da altri processi
  - *Poll* richiesti da altri processi
- Lo scheduler passa al processo chiamato
  - L'identificatore dell'evento
  - I dati associati all'evento

Scheduler dei processi (2/2)



Il System Loop (1/2)

- Al boot si avviano
  - I processi essenziali (e.g. che gestiscono i timer, lo stack TCP/IP, ...)
  - I processi per cui è previsto l'avvio automatico
- Dopodiché si chiama ripetutamente la funzione `process_run()`
  - Se è stato richiesto un poll, lo si esegue
  - Processa un singolo evento dalla coda degli eventi
  - Restituisce il numero degli eventi rimasti in coda
- Se la coda degli eventi è vuota, si va in *Low Power Mode*
  - Il sistema può essere svegliato da una interruzione esterna
    - ✓ Si ripete il ciclo

II System Loop (2/2)

```
int main(void) {                          -> Dal main source file
    initialize();                         -> Inizializza sistema, avvia processi base
    while(1) {                            -> System Loop infinito
        while(process_run() > 0);
        LPM_SLEEP();                      -> Ritorna quando una interruzione
    }                                        chiama la LPM_AWAKE()
    return 0;
}
/* ----------------- */
process_run(void) {                       -> Dal file process.c
    if(poll_requested)                    -> Processa i poll events
        do_poll();
    do_event();                           -> Processa un evento dalla coda
    return nevents + poll_requested;
}
```

Starting processes

- I processi sono avviati con il comando *process_start()*
  - Mette il processo nella lista dei processi attivi del kernel (controllando prima che non sia già presente)
  - Inizializza il Process Control Block (lo stato del processo diventa PROCESS_STATE_RUNNING)
  - Inizializza il Process_thread con il comando PT_INIT()
  - Dopo il comando, il processo è subito eseguito
  - Il processo avviato riceve un evento sincrono PROCESS_EVENT_INIT

Exiting and Killing processes

- Un processo termina autonomamente
  - Chiamando la funzione PROCESS_EXIT()
  - Quando il Process Thread raggiunge lo statement PROCESS_END()
- Il processo può essere terminato da un altro processo
  - Chiamando la funzione *process_exit()*
  - Il processo chiuso riceve l'evento PROCESS_EVENT_EXIT
- Quando un processo è terminato, il kernel invia un evento sincrono (PROCESS_EVENT_EXITED) a tutti gli altri processi
  - Per informarli riguardo al processo uscente
  - Per liberare eventuali risorse occupate (e.g. uIP TCP/IP stack)
- Infine, il processo è eliminato dalla coda dei processi attivi

Funzioni di scheduling

1. `void process_start (struct process *p, const char * arg)`

   - Parametri:
     - ✓ *p* Un puntatore al PCB del processo
     - ✓ *arg* Un puntatore all'argomento che può essere passato al nuovo processo

2. `void process_exit (struct process *p)`

   - Parametri:
     - ✓ *p* Un puntatore al PCB del processo

Autostarting Processes

- L'autostart module permette di avviare automaticamente i processi
  - Al boot del sistema
  - Quando il modulo contenente i processi è caricato
- Si crea una lista dei processi da avviare
  - Tramite la macro *AUTOSTART_PROCESSES(variabili_PCB)*
  - È il metodo più comune per avviare processi utente
- Un modulo può informare il sistema circa i processi attivi contenuti
  - La lista indica quali processi avviare quando il modulo è caricato
  - La lista è usata anche per terminare i processi quando il modulo è unloaded

Processo di esempio

Processo di esempio (1/2)

```
1.  #include "contiki.h"
2.
3.  PROCESS(example_process, "Example process");
4.  AUTOSTART_PROCESSES(&example_process);
5.
6.  PROCESS_THREAD(example_process, ev, data)
7.  {
8.      PROCESS_BEGIN();
9.
10.     while(1) {
11.         PROCESS_WAIT_EVENT();
12.         printf("Got event number %d\n", ev);
13.     }
14.
15.     PROCESS_END();
16. }
```

Processo di esempio (2/2)

```
static char msg[] = "Data";

static void example_function(void)

{

   /*  Start "Example process", and send it a NULL pointer. */

   process_start(&example_process, NULL);

   /*  Send the PROCESS_EVENT_MSG event synchronously to "Example   process",
       with a pointer to the message in the array 'msg'. */

   process_post_synch(&example_process, PROCESS_EVENT_CONTINUE, msg);

   /*  Send the PROCESS_EVENT_MSG event asynchronously to "Example  process",
       with a pointer to the message in the array 'msg'. */

   process_post(&example_process, PROCESS_EVENT_CONTINUE, msg);

   /*  Poll "Example process". */

   process_poll(&example_process);

}
```

Riferimenti

[1] A. Dunkels, B. Gronvall, T. Voigt, "Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors", IEEE International Conference on Local Computer Networks, 16-18 November 2004

[2] A. Dunkels, O. Schmidt, T. Voigt, M. Ali, "Protothreads: simplifying event-driven programming of memory-constrained embedded systems", ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), 2006

[3] Contiki, Processes. Available Online at: https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/Processes

[4] A. Dunkels, "Contiki 2.6: The Contiki Operating System" *(Doxygen Doc)*. Available Online at: http://contiki.sourceforge.net/docs/2.6/

[5] T. Voigt, "Contiki COOJA Crashcourse", The International School on Cooperative Robots and Sensor Networks (RoboSense School 2012), Hammamet, Tunisia, December 2012

[6] F. Hermans, "A Practical Introduction to Sensor Network Programming". Available Online at: http://www.it.uu.se/edu/course/homepage/wcnes/vt11/schedule/slides-lab-intro-lecture-wcnes.pdf

[7] N. Triolo, "Protothreads e sistemi operativi". Available Online at: http://didawiki.cli.di.unipi.it/lib/exe/fetch.php/rhs/protothread_2012.pdf

[8] A. Dunkels, "Programming Contiki (processes, protothreads, uIP, Rime)", the Contiki Hands-On Workshop 2007, Stockholm, Sweden, March 2007