

Echtzeitsysteme - Übungen

Nicht-periodische Aufgaben: Extended Scope

Sommersemester 2024

Eva Dengler Peter Wägemann

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

Ereignisse in eCos

- Events

- Mailbox

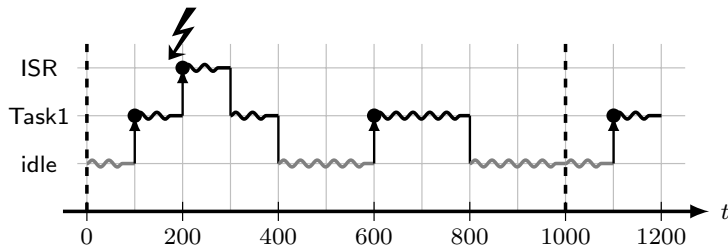
Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten



- *Interrupt*: Hardwareunterstützung für Kontrolltransfer an Interrupt-Handler
- *Interrupt-Handler*: Code, der beim Auftreten des Interrupts ausgeführt wird
- *Interrupt-Vektor*: Nummer & Speicheradresse des Interrupt-Handlers
- *Interrupt-Controller*: Hardwareeinheit für Interruptbehandlung
- *Pending Interrupt*: noch nicht abgearbeiteter Interrupt
- *Interrupt-Latenz*: Zeit bis Interrupt erkannt/behandelt wird
- *Geschachtelter Interrupt*

Probleme von Interrupts [1, 2]



- *Prioritätsverletzungen*
- Auftrittshäufigkeit
 - Maximale Auftrittsfrequenz (= minimale Zwischenankunftszeit)
 - Soft- oder hardwareseitige Überwachung
- Auftrittszeitpunkte
 - Zeitliche Garantien jederzeit gewährleisten
 - Zugriff auf Ressourcen

Checkliste für Interrupts in (V)EVS [1]

1. *Scheduling*: Analyse muss Interrupts (als Overheads) beachten
2. *Zeitanalyse*
 - Bestimmung der **maximalen Auftrittsfrequenz**
 - WCET-Analyse der Interrupt-Behandlung (in Isolation)
3. *Aufrufgraphen*
 - **Identifikation der Kontexte** in denen Interrupts auftreten könnten
 - ISR → DSR → `cyg_thread_resume()`
4. *Korrektheit des Stacks*
 - Gemeinsamer Stack?
 - Effekte von Interrupts auf Stack-Anordnungen
 - Bestimmung von **Stack-Budgets** (worst-case stack usage)
5. *Korrektheit der Nebenläufigkeiten*
 - Identifikation von Datenstrukturen auf die nebenläufig zugegriffen wird
 - Vermeidung von **Race-Conditions**, Verwendung atomarer Operationen

Interrupt Scheduler [2]

- Detektion & **Behandlung falscher Interrupts** (spurious interrupts)
- Externe Geräte können fehlerhaft sein \rightsquigarrow *Babbling Idiot*
- Software-Lösung
 - Zählen von Interrupts über Zeitintervall
 - Verwendet in Linux ¹
 - Nur möglich wenn WCET(ISR) < minimale Zwischenankunftszeit
 - Detektion von *spurious interrupts*
 - Deaktivierung des IRQs
 - Adaptives Pollen von Geräten \Rightarrow Zusätzlicher Laufzeit-Overhead
- Hardware-Lösung (bevorzugt für harte Echtzeit)
 - **Zählen in Hardware** der Auftrittshäufigkeiten
 - TriCore CPU erlaubt Zählen von externen Ereignissen (Komparatoren)
 - Überwachung implementierbar
 - Kein zusätzlicher Laufzeit-Overhead (außer Konfigurationsaufwand)

¹<https://github.com/torvalds/linux/blob/master/kernel/irq/spurious.c>

Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

Ereignisse in eCos

Events

Mailbox

Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten

Rekapitulation der Vorlesung (Kapitel 5-1)

Nicht-periodische Aufgaben

- Definiert durch $T_i = (i_j, e_j, D_j)$
- *Aperiodische* vs. *sporadische* Aufgabe
- *Mischbetrieb*: periodisch \leftrightarrow sporadisch/aperiodisch
 - *Dynamische* Einplanung
 - Beeinflussung periodischer Aufgaben?
 - Übernahmeprüfung \leftrightarrow Antwortzeitminimierung

Nicht-periodische Arbeitsaufträge

- Kaum a-priori Wissen (Zeitpunkt, ...)
- Herausforderung Mischbetrieb: Erhaltung statischer Garantien
- Abweisung (spor. Aufg.): schwerwiegende Ausnahmesituation

Rekapitulation der Vorlesung (Forts., Kapitel 5-1)

Basistechniken zur Umsetzung

- Unterbrecherbetrieb \rightsquigarrow Bevorzugt nicht-periodische Aufgaben
- Hintergrundbetrieb \rightsquigarrow Stellt nicht-periodische Aufgaben hinten an
- Slack Stealing
 - Idee: Termin ist maßgeblich
 - \rightsquigarrow *Verschieben* periodischer Aufgaben möglich
 - *Erfordert Unterbrecherbetrieb*
 - Problem: Schlupfzeit bestimmen
 - Zeitsteuerung (mit Rahmen): einfach $\rightsquigarrow f - x_k$
 - Ereignissteuerung: schwierig \rightsquigarrow dynamische Berechnung
- Zusteller \rightsquigarrow Konvertieren nicht-period. in periodische Aufgaben
 - Spezielle periodische Aufgabe $T_s = (p_s, e_s)$
 - Ausführungsbudget, Auffüllperiode und -regeln
 - Abbildung auf Prioritätswarteschlange (z. B. AJQ)

Periodische Zusteller

- Verschiedene Ausführungen
z. B.: Polling, Deferrable, Sporadic Server
- Unterscheiden sich im Regelwerk
- i. d. R. für mehrere Aufgaben zuständig

Beispiel: Abfragender Zusteller (Polling Server)

- Periodische Aufgabe $T_p = (p_s, e_s)$
- Budget e_s verfällt
- Im Falle sporadischer Aufgaben schwierig:
 - $p_p \leq \frac{D_s}{2}$, wobei $D_s \leq i_s \rightsquigarrow$ Abtasttheorem
 - hohe Abtastfrequenz, Überlastgefahr

Rekapitulation der Vorlesung (Forts., Kapitel 5-2)

Bandweite-bewahrende Zusteller

- Budget bleibt erhalten
 - ↳ Verbesserung des Abfragebetriebs
- Regelwerk wird erweitert
 - ↳ Auffüll- und Konsumregeln
- Betriebssystem (Scheduler) wacht über Budget

Auslegung

- Große Budget
 - ↳ Berücksichtigung aller (nicht-)periodischer Aufgaben
- Verbesserung Antwortzeit
 - ↳ Kombination mit Hintergrundbetrieb

Rekapitulation der Vorlesung (Forts., Kapitel 5-2)

Beispiel: Aufschiebbarer Zusteller (Deferrable Server)

- Verbrauchsregel: verbraucht $\frac{1}{\text{Zeiteinheit}}$ Budget bei Tätigkeit
- Auffüllregel: periodisches Auffüllen von e_s mit p_s
- Keine Akkumulation

Achtung: aufschiebbarer Zusteller \neq periodische Aufgabe

- **Double hit**
 - \rightsquigarrow Kritischer Zeitpunkt und Auffüllzeitpunkt fallen zusammen
- \rightsquigarrow Störung ist bis zu e_s größer als bei periodischer Aufgabe

Rekapitulation der Vorlesung (Forts., Kapitel 5-2)

Lösungsansatz: Sporadischer Zusteller (Sporadic Server)

- Verschiedene Ausprägungen
- Beansprucht niemals mehr Zeit als periodische Aufgabe

Beispiel: SpSL Sporadic Server (Sprunt, Sha & Lehoczky)

- Verbraucht $\frac{1}{\text{Zeiteinheit}}$ Budget bei Tätigkeit
- Aufgefüllt wird entsprechend dem Verbrauchsmuster
 - Nächster Auffüllzeitpunkt wird zu Beginn der Tätigkeit bestimmt
 - Aufzufüllendes Budget zum Ende der Tätigkeit
 - \rightsquigarrow Auffüllregeln R1 – R3
- SpSL Sporadic Server
 - \rightsquigarrow Menge von Aufgaben T_i mit $p_i = p_s$ und $\sum e_i = e_s$

Rekapitulation der Vorlesung (Forts., Kapitel 5-2)

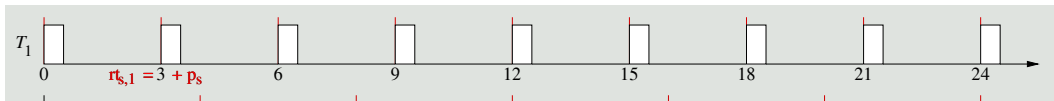
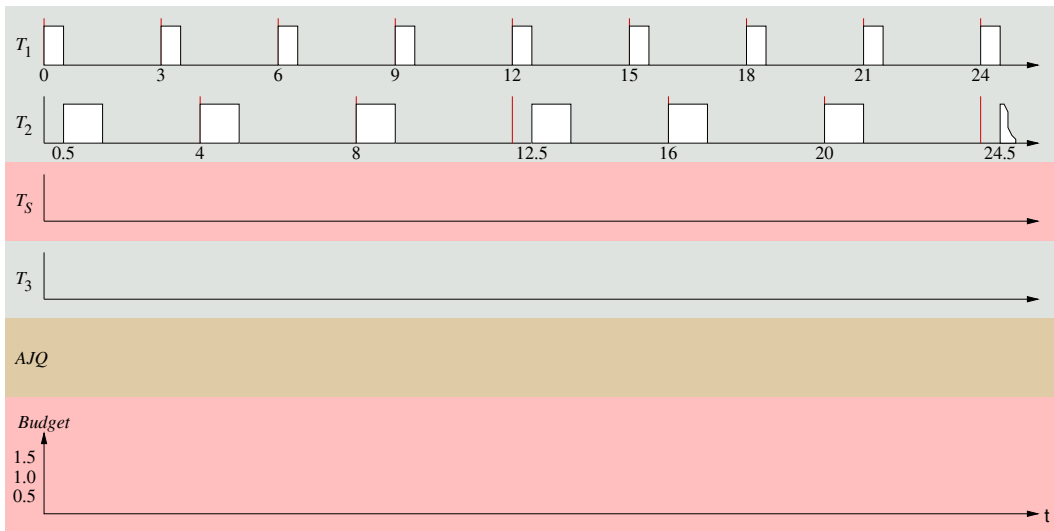
Forts.: SpSL Sporadic Server, Auffüllregeln

- R1: initiales Budget ist e_s
- R2: Auffüllzeitpunkt $rt_s = t_b + p_s$, wobei:
 - T_s besitzt Budget, dann $t_b = P_s$ wird tätig
 - T_s hat kein Budget, dann $t_b = P_s$ *ist* tätig und T_s *erhält Budget*
- R3: Budgetberechnung
 - Sobald P_s untätig wird oder T_s kein Budget mehr hat
 - Budget für rt_s = Verbrauch von T_s seit t_b

Achtung

- P_s bezeichnet das **Tasksystem** ab der Priorität s (und höher)
- Im Beispiel: kleinere Zahl \rightsquigarrow höhere Priorität

Beispiel: SpSL $T_1 = (3, 0.5)$, $T_2 = (4, 1)$, $T_3 = (19, 4.5)$ und $T_s = (5, 1.5)$; RM-Ablaufplanung



Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

Ereignisse in eCos

Events

Mailbox

Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten

Kausalordnung

- Relation: Ursache, Wirkung
- Mehrere Ursache-Wirkungspaare überlappend: Nebenläufigkeit
- Nebenläufigkeit vs. Gleichzeitigkeit
- ☞ Sequentialisierung von Aufgaben

Rangfolge

- Abhängigkeit von Kontrollfluss \rightsquigarrow Reihenfolge
- Oft in Datenabhängigkeiten begründet
 - Produzent/Konsument Verhältnis
 - Konsumierbare Betriebsmittel (Nachrichten, Interrupts, ...)
 - **Begrenzte** Puffer limitieren die Anzahl häufig
- ☞ Beachtung unterschiedlicher **zeitlicher Domänen**

Koordinierung

- Unnötig falls Rangfolge egal
 - Neuester Wert ist ausreichend
- Durch Einplanung \rightsquigarrow analytische Verfahren
 - Periodische Aufgaben \rightsquigarrow **Passende Perioden!**
 - Ablauftabelle
 - Keine Kontrolle zur Laufzeit
- Durch Kooperation \rightsquigarrow konstruktive Verfahren
 - Periodische und nicht-periodische Aufgaben
 - Synchronisation \rightsquigarrow Vielzahl von Möglichkeiten
 - **In zeitgesteuerten Systemen unsinnig!**

Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

Ereignisse in eCos

Events

Mailbox

Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten

Signalisieren von Ereignissen

- Signale unterstützen *Produzent-Konsument Muster*
- Thread/DSR *signalisiert* Ereignis (z. B. Tastendruck)
... konsumierender Thread *wartet*
- Umsetzung: 32-bit Integer \rightsquigarrow 32 *Einzelsignale* pro Flag
 - Ein Flag erlaubt somit $2^{32} - 1$ Signalkombinationen
 - Threads können auf ein Signalmuster blockierend warten oder pollen

Achtung:

Flags zählen keine Ereignisse! (vgl. HW-Interrupts)

²<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-flags.html>

- Produzenten/Konsumenten teilen sich eine Flag-Objekt
- Dieses wird von der *Anwendung* bereitgestellt (vgl. Alarmobjekt)
- Flag-Objekt muss initialisiert werden:

```
cyg_flag_init(cyg_flag_t* flag)
```

- Signal(e) im Flag setzen:

```
cyg_flag_setbits(cyg_flag_t* flag, cyg_flag_value_t value)
```

- Bzw. zurücksetzen:

```
cyg_flag_maskbits(cyg_flag_t* flag, cyg_flag_value_t value)
```

- Auf Signal warten/pollen:

```
cyg_flag_value_t cyg_flag_wait/poll(cyg_flag_t* flag,  
                                     cyg_flag_value_t pattern,  
                                     cyg_flag_mode_t mode);
```

- Warten mit zeitlicher Obergrenze:

```
cyg_flag_value_t cyg_flag_timed_wait(cyg_flag_t* flag,  
                                      cyg_flag_value_t pattern,  
                                      cyg_flag_mode_t mode,  
                                      cyg_tick_count_t abstime);
```

- `cyg_flag_value_t` pattern setzt gewünschte Signalkombination
- `cyg_flag_mode_t` legt Weckmuster fest
 - `CYG_FLAG_WAITMODE_AND`: alle konfigurierten Signale müssen aktiv sein; sie bleiben nach Aufwachen gesetzt
 - `CYG_FLAG_WAITMODE_OR`: mindestens eines der konfigurierten Signale muss aktiv sein; alle Signale bleiben nach dem Aufwachen gesetzt
 - `CYG_FLAG_WAITMODE_OR` | `CYG_FLAG_WAITMODE_CLR`: mindestens eines der konfigurierten Signale muss aktiv sein; alle gesetzten Signale werden nach dem Aufwachen gelöscht

```
1 static cyg_flag_t flag0;
2
3 void my_dsr(cyg_vector_t v,
4            cyg_ucount32 c,
5            cyg_addrword_t d){
6     cyg_flag_setbits(&flag0, 0x02);           // 0b00000010
7 }
8
9 void user_thread(cyg_addr_t data){
10     while(true) {
11         cyg_flag_value_t val;
12         val = cyg_flag_wait(&flag0, 0x22, // 0b00100010
13                            CYG_FLAG_WAITMODE_OR
14                            | CYG_FLAG_WAITMODE_CLR);
15         ezs_printf("Event! %" PRIu32 "\n", (cyg_uint32) val);
16         // Prints "Event! 2"
17     }
18 }
19
20 void cyg_user_start(void){
21     ...
22     cyg_flag_init(&flag0);
23     ...
24 }
```



- Zwischen Threads können *Nachrichten* versendet werden
- Konsument erzeugt einen Briefkasten (engl. mailbox) fester Größe
- Produzenten legt Nachrichten dort ab
 - Inhalt: Zeiger auf beliebige Datenstruktur
 - Konsument kann auf *Nachrichteneingang* blockieren
 - Produzent blockiert, falls Briefkasten *voll*
 - Aber auch *nicht-blockierende* Aufrufvarianten

³<http://ecos.sourceforge.org/docs-latest/ref/kernel-mail-boxes.html>

■ Mailbox anlegen:

```
void cyg_mbox_create(cyg_handle_t* handle, cyg_mbox* mbox);
```

■ Nachricht verschicken:

```
cyg_bool_t cyg_mbox_put(cyg_handle_t mbox, void* item);
```

■ Nachricht empfangen:

```
void* cyg_mbox_get(cyg_handle_t mbox);
```

■ Empfang *und* Versand können blockieren

■ **try**-Versionen: Würde ich blockieren?

■ **timed**-Versionen: Blockieren für bestimmte Zeit

→ Selbststudium!

⁴<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-mail-boxes.html>

Versenden von Nachrichten – Beispiel

■ Initialisierung:

```
1 static cyg_handle_t mailbox_handle;
2 static cyg_mbox     mailbox;
3 void cyg_user_start(void) {
4     cyg_mbox_create(&mailbox_handle, &mailbox);
5     ...
6 }
```

■ Produzent (Sender):

```
1 void producer_entry(cyg_addrword_t data) {
2     ...
3     cyg_mbox_put(mailbox_handle, &my_message);
4     ...
5 }
```

■ Konsument (Empfänger):

```
1 void consumer_entry(cyg_addrword_t data) {
2     ...
3     void *message = cyg_mbox_get(mailbox_handle);
4     ...
5 }
```

Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

Ereignisse in eCos

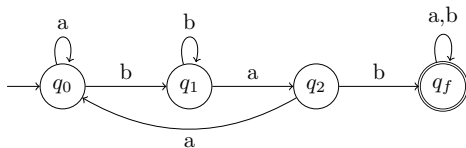
Events

Mailbox

Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten

Aufgabe 6: Extended Scope



- Befehlschnittstelle für Oszilloskop
- Auswertung von Benutzereingaben
 - Unterbrecher-, Hintergrundbetrieb, Periodischer Zusteller
→ **nicht SpSL implementieren!**
- *Moduswechsel* (VL 4-3)
 - Dynamische Anpassung je nach Situation (Rekonfiguration der Ablauf Tabellen)
 - Systemweite Koordination mittels *Zustandsmaschine*
- Erweiterte Übung
 - Rangfolge
 - Mailboxen, Events

Interrupts in Echtzeitsystemen

Zustellerkonzepte

Rangfolge & Synchronisation

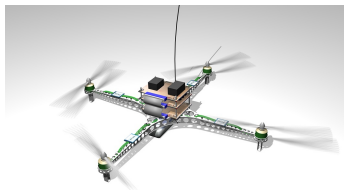
Ereignisse in eCos

Events

Mailbox

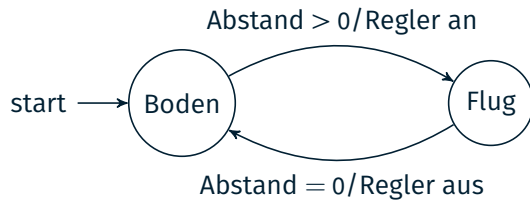
Aufgabe 6: Extended Scope

Exkurs: Zustandsautomaten



- I4Copter grundsätzlich instabil
- ↪ Fluglageregelung zwingend erforderlich
- Im Flug: Regelkreis geschlossen
- **Aber:** Am Boden Regelkreis offen
 - ↪ Regler darf am Boden nicht laufen
 - Andernfalls **Verfälschung des Reglerzustands**

⇒ Zustandsmaschine mit zwei Zuständen



```
1 enum FlightState {
2     Landed,
3     InFlight
4 };
5
6 enum Event {
7     GroundDistanceGreaterThanZero,
8     GroundDistanceZero
9 };
10
11 static FlightState g_flightState;
```



```
1 static void state_init(void) {
2     calibrateSensors();
3     initializeController();
4
5     g_flightState = Landed;
6 }
7
1 static void event_loop(void) {
2     state_init();
3     while (true) {
4         Event event = waitForEvent();
5         state_transition(event);
6     }
7 }
```

- In Zustand z.B. zyklischer Ablaufplan
- Analyse einzelner Zustände

Zustandsübergang

```
1 static void state_transition(Event event) {
2     switch (g_flightState) {
3         case Landed:
4             state_transition_landed(event);
5             break;
6         case InFlight:
7             state_transition_inFlight(event);
8             break;
9     }
10 }
11 static void state_transition_landed(Event event) {
12     if (event == GroundDistanceGreaterThanZero) {
13         action_controllerOn();
14         g_flightState = InFlight;
15     }
16 }
17 static void state_transition_inFlight(Event event) {
18     if (event == GroundDistanceZero) {
19         action_controllerOff();
20         g_flightState = Landed;
21     }
22 }
```

[1] John Regehr.

Safe and structured use of interrupts in real-time and embedded software.

Handbook of Real-Time and Embedded Systems, I. Lee, JY-T. Leug, and SH Son, Eds. Chapman and Hall/CRC, pages 1–13, 2007.

[2] John Regehr and Usit Duongsaa.

Preventing interrupt overload.

In Proceedings of the 2005 ACM SIGPLAN/SIGBED Conference on Languages, Compilers and Tools for Embedded Systems (LCTES '05), pages 50–58, New York, NY, USA, 2005. ACM Press.