

Echtzeitsysteme

Physikalisches Objekt ↔ Kontrollierendes Rechensystem

Peter Ulbrich

Lehrstuhl Informatik 4

14. Oktober 2014

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Fallbeispiel Quadrokopter
 - Kontrolliertes Objekt
 - Kontrollierendes Rechensystem
 - Zusammenspiel
 - Rolle der Echtzeitanwendung
- 3 Programmunterbrechung
 - synchron vs. asynchron
 - Ausnahmebehandlung
 - Zustandssicherung
- 4 Zusammenfassung

Fragestellungen

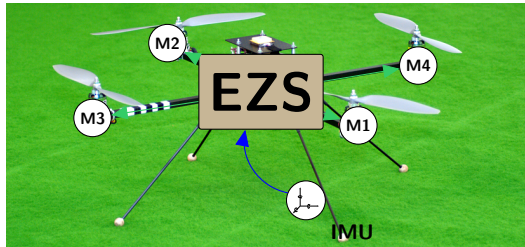
- Welche Berührungspunkte gibt es zwischen dem physikalischen Objekt und dem kontrollierenden Echtzeitsystem?
 - Woher stammen die **Terminvorgaben** für das Echtzeitrechensystem?
- Welche Rolle spielt überhaupt die **Echtzeitanwendung**?
 - Wie ist sie in das Echtzeitrechensystem eingepasst?
 - Welche Elemente gehören noch zum kontrollierenden Rechensystem?
- Was beeinflusst das Laufzeitverhalten der Echtzeitanwendung?
 - Was muss man für die Beurteilung der Rechtzeitigkeit betrachten?
 - Welche Rolle spielen beispielsweise **Unterbrechungen**?
 - Wie hoch sind die **Verwaltungsgemeinkosten** von Unterbrechungen?

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Fallbeispiel Quadrokopter
 - Kontrolliertes Objekt
 - Kontrollierendes Rechensystem
 - Zusammenspiel
 - Rolle der Echtzeitanwendung
- 3 Programmunterbrechung
 - synchron vs. asynchron
 - Ausnahmebehandlung
 - Zustandssicherung
- 4 Zusammenfassung

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



Quadrokoopter sind **inhärent instabil** \leadsto ständige, aktive Kontrolle
Aufgabe des Echtzeitrechensystems: **Fluglageregelung** (Stabilisierung)

- Bewegung im Raum bestimmen (engl. **inertial measurement unit**)
- Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl

\leadsto Setzt sich zusammen aus: **Objekt**, **Rechensystem**, **Anwendung**

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die **Schrittfunktion** verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die **Antwortfunktion** beschrieben.

Eine **Änderung der Rotordrehzahl** des Quadrokoopter beeinflusst dessen **Lage im Raum**, bis ein **Gleichgewicht** zwischen Sollzustand und tatsächlichem Zustand hergestellt wurde:

- **Wie lange dauert es** bis zum Gleichgewicht? \leadsto **Objektdynamik**
 - Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...

Zeitparameter zur Charakterisierung der Schritt-/Antwortfunktion:

d^{object} Zeitdauer bis sich die Lage des Quadrokoopter zu ändern beginnt

- hervorgerufen durch die (initiale) Trägheit des Objektes
- auch als Prozessverzögerung (engl. *process lag*) bezeichnet

d^{rise} Zeitdauer bis zum (erneuten) Gleichgewicht

Kontrollierendes Rechensystem

Echtzeitrechensystem

Die Lage des Quadrokoopter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage von der Gleichgewichtslage zu erkennen:

d^{sample} Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Abtastungen

- analoge auf digitale Werte abbilden \leadsto A/D-Wandlung
- Faustregel: $d^{sample} < (d^{rise}/10)$
 - quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems

f^{sample} Abtastfrequenz, entspricht $1/d^{sample}$

Abweichung (Ist-/Sollwert) bestimmen und dem Regelungsalgorithmus zur Berechnung des neuen Stellwertes zuführen:

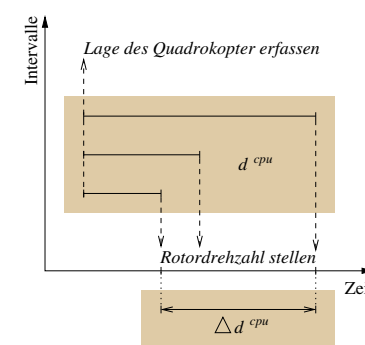
d^{cpu} Zeitdauer bis zur Ausgabe des neuen Stellwertes

- digitale auf analoge Werte abbilden \leadsto D/A-Wandlung
- Randbedingung: $d^{cpu} < d^{sample}$

Δd^{cpu} Differenz zwischen Minimum und Maximum von d^{cpu}

Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen



d^{cpu} ist trotz konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel

- verdrängende Einplanung
- überlappende Ein-/Ausgabe
- Programmunterbrechungen
- Busüberlastung, DMA

Δd^{cpu} fügt Unschärfe zum Zeitpunkt der Lagebestimmung hinzu

- bewirkt zusätzlichen Fehler
- beeinträchtigt die Dienstgüte

- **unbekannte variable Verzögerungen** können bei der Regelung nicht kompensiert werden, aber bekannte konstante Verzögerungen

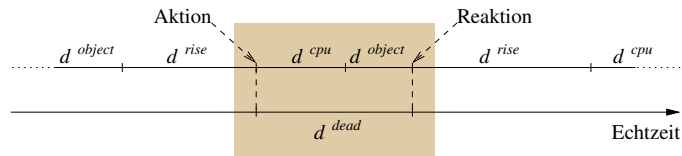
- Randbedingung: $\Delta d^{cpu} \ll d^{cpu}$

Kontrolliertes Objekt \leftrightarrow Kontrollierendes Rechensystem

Totzeit des offenen Regelkreises

d^{dead} Zeitintervall zwischen Start der Aktion zur Stellwertberechnung und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object} , d.h.:
 - 1 der Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
 - 2 der Dynamik des kontrollierten Objektes

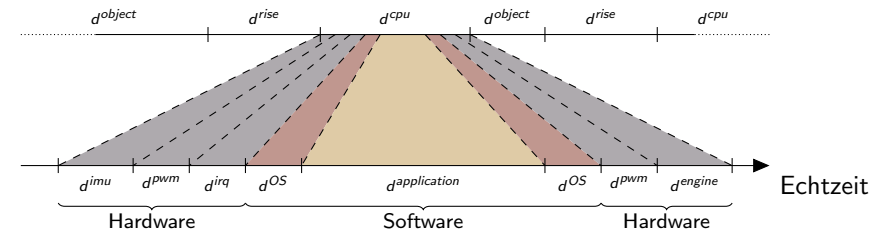


- beeinträchtigt Güte und **Stabilität** der Kontrollschleife
 - insbesondere in Anbetracht der mit d^{cpu} gegebenen Varianz
- gibt eine relative Ungewissheit über die erzielte Wirkung

Vorgänge im Rechensystem – Echtzeitanwendung

Aus welchen Komponenten setzt sich d^{cpu} zusammen?

Das kontrollierende Rechensystem setzt sich aus verschiedenen Sensoren, Peripherie-Elementen und Softwarekomponenten zusammen.



Alle Komponenten eines Echtzeitsystems müssen bedacht werden!

Sensoren/Aktoren Abtastrate ($\sim d^{imu}$), Motorleistung ($\sim d^{engine}$)

Mikrocontroller Signalverarbeitung ($\sim d^{pwm}$), IRQ ($\sim d^{irq}$)

Betriebssystem Unterbrechungslatenz, Kontextwechsel ($\sim d^{OS}$)

Anwendung Steuerung, Regelung ($\sim d^{application}$)

Zeitbedarf im kontrollierenden Rechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

Häufig ist eine eigenständige Beurteilung des Zeitbedarfs nicht möglich, Herstellerangaben ermöglichen die Abschätzung des **schlimmsten Falls**.

d^{imu} Gyroskop ITG-3200 – Abtastrate: 4 Hz – 8 kHz [1]

d^{adc} Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5 μ s @ 10 Bit [2]

d^{irq} Infineon TriCore Arbitrierung: 5 - 11 Takte @ 150 MHz [2]

d^{OS} CiAO OS Fadenwechsel: ≤ 219 Takte @ TriCore (50 MHz) [3]

Alleine die **Anwendung** kann (fast) komplett kontrolliert werden.¹

¹Lässt man zugeliferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Fallbeispiel Quadrokoopter
 - Kontrolliertes Objekt
 - Kontrollierendes Rechensystem
 - Zusammenspiel
 - Rolle der Echtzeitanwendung
- 3 Programmunterbrechung
 - synchron vs. asynchron
 - Ausnahmebehandlung
 - Zustandssicherung
- 4 Zusammenfassung

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

Welche Elemente beeinflussen das zeitliche Verhalten einer Echtzeitanwendung?

- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
 - Kann man sich auf die Echtzeitanwendung selbst beschränken?
 - Kann das Betriebssystem oder das Laufzeitsystem ignoriert werden?
 - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
- Auf welcher Ebene muss man diese Betrachtung durchführen?
 - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
 - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?

☞ exemplarische Illustration anhand von Programmunterbrechungen

Synchrone Programmunterbrechung

- unbekannter Befehl, falsche Adressierungsart oder Rechenoperation
- Systemaufruf, Adressraumverletzung, unbekanntes Gerät

Trap ↦ synchron, vorhersagbar, reproduzierbar

- geschieht abhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms:
 - unverändertes Programm, mit den selben Eingabedaten versorgt
 - auf ein und dem selben Prozessor zur Ausführung gebracht
- die Unterbrechungsstelle im Programm ist vorhersehbar

☞ die Programmunterbrechung/-verzögerung ist deterministisch

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen werden unterschieden:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

asynchron die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

Unterschiede ergeben sich hinsichtlich...

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarkeit

☞ Behandlung ist zwingend und grundsätzlich prozessorabhängig

Wiederholung/Vertiefung empfohlen...

- zu Unterbrechungen siehe auch „Betriebssystemtechnik“ [4]

Asynchrone Programmunterbrechung

- Signalisierung „externer“ Ereignisse
- Beendigung einer DMA- bzw. E/A-Operation

Interrupt ↦ asynchron, unvorhersagbar, nicht reproduzierbar

- tritt unabhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms auf:
 - hervorgerufen durch einen „externen Prozess“ (z.B. ein Gerät)
 - ein Ereignis signalisierend
- die Unterbrechungsstelle im Programm ist nicht vorhersehbar

☞ die Programmunterbrechung/-verzögerung ist nicht deterministisch

Trap/Interrupt \leadsto Ausnahmesituationen

Ereignisse, oftmals unerwünscht aber nicht immer eintretend:

- Signale von der Peripherie (z.B. E/A, Zeitgeber oder „Wachhund“)
- Wechsel der Schutzdomäne (z.B. Systemaufruf)
- Programmierfehler (z.B. ungültige Adresse)
- unerfüllbare Speicheranforderung (z.B. bei Rekursion)
- Einlagerung auf Anforderung (z.B. beim Seitenfehler)
- Warnsignale von der Hardware (z.B. Energiemangel)

Ereignisbehandlung, die problemspezifisch zu gewährleisten ist:

- als Ausnahme während der „normalen“ Programmausführung

Zustandssicherung

Prozessorstatus invariant halten

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe²

- Statusregister (SR)
- Befehlszeiger (engl. *program counter*, PC)

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den restlichen Zustand

- alle $\left\{ \begin{array}{l} \text{dann noch ungesicherten} \\ \text{flüchtigen} \\ \text{im weiteren Verlauf verwendeten} \end{array} \right\}$ CPU-Register

je nach CPU werden dabei wenige bis sehr viele Daten(bytes) bewegt

²Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Ausnahmebehandlung

Abrupter Zustandswechsel

Programmunterbrechungen implizieren **nicht-lokale Sprünge**:

- vom $\left\{ \begin{array}{l} \text{unterbrochenen} \\ \text{behandelnden} \end{array} \right\}$ zum $\left\{ \begin{array}{l} \text{behandelnden} \\ \text{unterbrochenen} \end{array} \right\}$ Programm

Sprünge (und Rückkehr davon), die **Kontextwechsel** nach sich ziehen:

- erfordert Maßnahmen zur Zustandssicherung/-wiederherstellung
- Mechanismen dazu liefert das behandelnde Programm selbst
 - bzw. eine tiefer liegende Systemebene (Betriebssystem, CPU)

der **Prozessorstatus** unterbrochener Programme muss invariant sein

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen

Unabhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

... alle dann noch ungesicherten CPU-Register:

Zeile	x86	m68k
1:	train:	train:
2:	pushal	moveml d0-d7/a0-a6,a7@-
3:	call handler	jsr handler
4:	popal	moveml a7@+,d0-d7/a0-a6
5:	iret	rte

train (trap/interrupt):

- Arbeitsregisterinhalte im RAM sichern (2) und wiederherstellen (4)
- Unterbrechungsbehandlung durchführen (3)
- Ausführung des unterbrochenen Programms wieder aufnehmen (5)

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

Abhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

... alle **flüchtigen Register**³ (engl. *volatile register*) der CPU:

x86

```
train:
    pushl %edx
    pushl %ecx
    pushl %eax
    call handler
    popl %eax
    popl %ecx
    popl %edx
    iret
```

m68k

```
train:
    moveml d0-d1/a0-a1,a7@-
    jsr handler
    moveml a7@+,d0-d1/a0-a1
    rte
```

³Register, deren Inhalte nach Rückkehr von einem Prozeduraufwurf verändert werden sein dürfen: festgelegt in den **Prozedurkonventionen** des Kompilers.

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

Abhängigkeit von den Eigenschaften des Kompilers

... alle im weiteren Verlauf verwendeten CPU-Register:

gcc

```
void __attribute__((interrupt)) train () {
    handler();
}
```

__attribute__((interrupt))

- Generierung der speziellen Maschinenbefehle durch den **Kompilierer**
 - zur Sicherung/Wiederherstellung der Arbeitsregisterinhalte
 - zur Wiederaufnahme der Programmausführung
- nicht jeder „Prozessor“ (für C/C++) implementiert dieses Attribut

Aktivierungsblock (engl. *activation record*)

Sicherung/Wiederherstellung nicht-flüchtiger Register (engl. *non-volatile register*)

Türme von Hanoi

```
void hanoi (int n, char from, char to, char via) {
    if (n > 0) {
        hanoi(n - 1, from, via, to);
        printf("schleppe Scheibe %u von %c nach %c\n", n, from, to);
        hanoi(n - 1, via, to, from);
    }
}
```

Aufwand je nach CPU, Prozedur, Kompilierer: gcc -O6 -S hanoi.c

hanoi()-Eintritt

```
pushl %ebp
movl %esp,%ebp
pushl %edi
pushl %esi
pushl %ebx
subl $12,%esp
```

hanoi()-Austritt

```
leal -12(%ebp),%esp
popl %ebx
popl %esi
popl %edi
popl %ebp
ret
```

Für eine Prozedur aufrufende Ebene **inhaltsinvariante Register** der CPU, deren Inhalte jedoch innerhalb einer aufgerufenen Prozedur verändert werden:

gcc/x86 ~ ebp, edi, esi, ebx

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

(engl. *worst-case administrative overhead, WCAO*)

Latenz ... bis zum Start der Unterbrechungsbehandlung:

- 1 Annahme der Unterbrechung durch die Hardware
- 2 Sicherung der Inhalte der (flüchtigen) CPU-Register
- 3 Aufbau des Aktivierungsblocks der Behandlungsprozedur

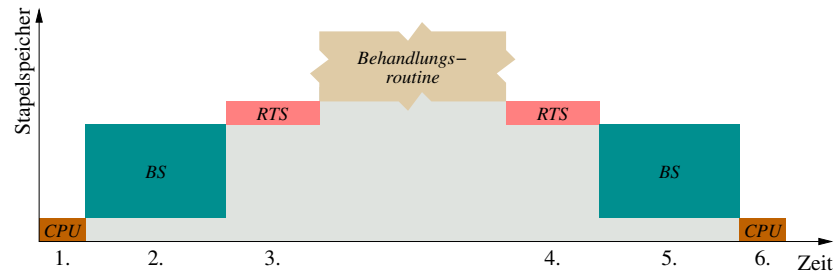
... bis zur Fortführung des unterbrochenen Programms:

- 4 Abbau des Aktivierungsblocks der Behandlungsprozedur
- 5 Wiederherstellung der Inhalte der (flüchtigen) CPU-Register
- 6 Beendigung der Unterbrechung

 **Zeitpunkte** und **Häufigkeit** der Gemeinkosten sind i. A. unbestimmbar

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls (Forts.)

Speicherplatz vs. Laufzeit



Systemkonstanten bzw. **Werte mit fester oberer Schranke** sind gefordert:

- CPU resp. Hardware
- Betriebssystem (BS), Laufzeitsystem (engl. *run-time system*, RTS)
- „Anwendung“ (Behandlungsroutine)

Resümee

Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt ↔ Kontrollierendes Rechensystem

- die **Objektdynamik** definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten
- ihr Anteil am kontrollierenden Rechensystem ist eher gering

Programmunterbrechung in synchroner oder asynchroner Ausprägung

- beeinflussen den Ablauf der Echtzeitanwendung
- Zustandssicherung, Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Fallbeispiel Quadrokopter
 - Kontrolliertes Objekt
 - Kontrollierendes Rechensystem
 - Zusammenspiel
 - Rolle der Echtzeitanwendung
- 3 Programmunterbrechung
 - synchron vs. asynchron
 - Ausnahmebehandlung
 - Zustandssicherung
- 4 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

- [1] INC., I. :
ITG-3200 Product Specification Revision 1.4.
<http://invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf>, 2010. – Data Sheet
- [2] INFINEON TECHNOLOGIES AG (Hrsg.):
TC1796 User's Manual (V2.0).
St.-Martin-Str. 53, 81669 München, Germany: Infineon Technologies AG, Jul. 2007
- [3] LOHMANN, D. ; HOFER, W. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. ; STREICHER, J. ; SPINCZYK, O. :
CiAO: An Aspect-Oriented Operating-System Family for Resource-Constrained Embedded Systems.
In: *Proceedings of the 2009 USENIX Annual Technical Conference.*
Berkeley, CA, USA : USENIX Association, Jun. 2009. – ISBN 978-1-931971-68-3, S. 215-228
- [4] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Betriebssystemtechnik.
<http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/BST>, 2009. – Lecture Notes