

Echtzeitsysteme

Abarbeitung periodischer Echtzeitsysteme

Lehrstuhl Informatik 4

10. November 2011

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 5 Zusammenfassung

Fragestellungen

- Was zeichnet **periodische Echtzeitsysteme** aus?
 - Welches **Vorwissen** ist in solchen Systemen verfügbar?
 - Reicht dies aus, um **sinnvolle Anwendungen** umzusetzen?
 - Welchen **Restriktionen** unterliegen solche Echtzeitsysteme?
- Basismechanismen für die Abarbeitung periodischer Jobs
 - **Ereignisgesteuerte Ausführung**
 - ereignisorientierte Einplanung
 - feste und dynamische Prioritäten
 - Berechnungskomplexität: Ablauftabelle vs. Ablaufliste
 - **Zeitgesteuerte Ausführung**
 - „*Busy Loop*“ vs. Ablauftabellen
 - zeitgesteuerte Abfertigung von Arbeitsaufträgen

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 5 Zusammenfassung

Periodische Aufgabe (engl. *periodic task*)

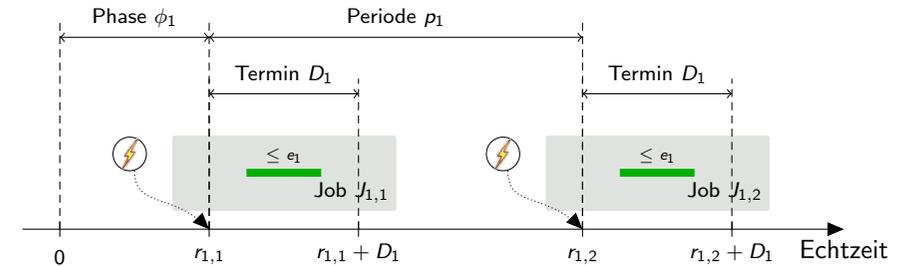
Vorabwissen

Aufgaben, die in (halb-) regelmäßigen Zeitintervallen kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen¹. Jede periodische Aufgabe $T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$ ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen mit

- p_i der Periode (engl. *period*)
- e_i der maximalen Ausführungszeit (WCET)
- D_i dem relativen Termin (engl. *deadline*)
- ϕ_i der Phase (engl. *phase*)

¹Nach [1] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den Auslösezeiten (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.

Periodische Aufgaben auf der Echtzeitachse



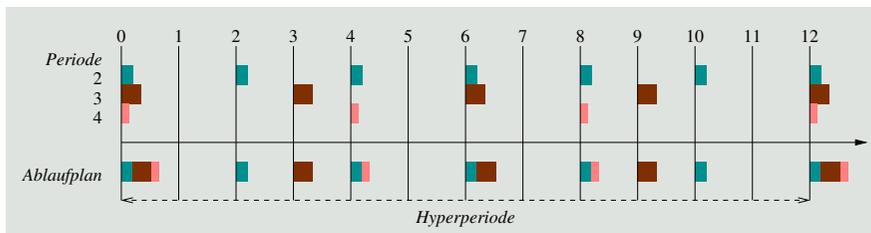
- Ausführungszeit e_i** : maximale Ausführungszeit aller Jobs $J_{i,j}$ in T_i
- relativer Termin D_i** : maximale Zeitspanne zwischen Auslösezeit $r_{i,j}$ und Fertigstellung eines Jobs $J_{i,j}$ in T_i
- Periode p_i** : minimale Länge aller Zeitintervalle $[r_{i,j}; r_{i,j+1})$ zwischen den Auslösezeiten der Jobs in T_i
- Phase ϕ_i** : Auslösezeit $r_{i,1}$ des ersten Jobs $J_{i,1}$ in T_i

Hyperperiode

Mix verschiedener Aufgaben mit unterschiedlichen Perioden

Zeitintervall, in dem alle periodischen Aufgaben (mindestens einmal) durchgelaufen sind und erneut zusammen zur Ausführung anstehen:

- **Hyperperiode H** , das kleinste gemeinsame Vielfache aller Perioden
- führt ggf. zu **Schwankungen in den Einlastungszeiten**



- maximale Anzahl aller Arbeitsaufträge in H ist $\sum_{i=1}^n H/p_i$
 - im vorliegenden Beispiel: $(12/2) + (12/3) + (12/4) = 13$

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis

Kann man Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

Echtzeitrechnungssysteme berechnen Stellwerte für Aktoren oft ohne ein unterliegendes konventionelles Kontrollsystem

- das kontrollierte Objekt erfährt dann eine **direkte digitale Kontrolle**
- die Kontrollanwendungen zeigen dabei eine hohe **Regelmäßigkeit**
 - eine meist endlose Sequenz von Kontrollperioden

Rückgekoppelte Kontrollschleife (engl. *feedback control loop*)

initialisiere Stellwert;

initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;

bei Zeitgeberunterbrechung erledige /* abtasten, regeln, steuern */

A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;

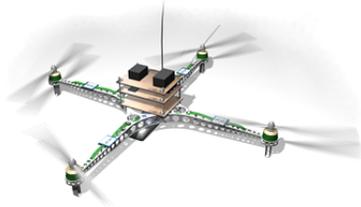
Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;

D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;

basta.

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

Kann man Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



periodische Regelungsaufgaben:

alle 3 ms z.B. Sensorabtastung, Sensordatenfusion, Fluglageregelung

alle 9 ms z.B. Höhenregelung

Die zeitliche Auflösung (d^{sample}) der Regelung richtet sich nach der Objektdynamik (d^{object} bzw. d^{rise}).

Restriktionen des periodischen Modells

Verzicht auf Entwicklungskomfort zugunsten einer realistischeren Analyse

Mathematische Ansätze zur Analyse periodischer Echtzeitsysteme schränken solche Systeme häufig stark ein:

- A1 Alle Aufgaben sind periodisch.
- A2 Alle Arbeitsaufträge können an ihren Auslösezeitpunkten eingeplant und ausgeführt werden.
- A3 Termine und Perioden sind identisch.
- A4 Kein Arbeitsauftrag gibt die Kontrolle über den Prozessor ab.
- A5 Alle Aufgaben sind unabhängig voneinander, d.h. die einzige gemeinsame Ressource ist die CPU und es existieren keine Einschränkungen hinsichtlich der Auslösezeiten der Arbeitsaufträge.
- A6 Der Overhead durch Unterbrechungen, Ablaufplanung oder Verdrängung ist vernachlässigbar.
- A7 Alle Aufgaben verhalten sich voll-präemptiv.

Implikationen

Einschränkungen, die Einfluss auf Anwendungen ausüben

Betriebsmittel *gemeinsame Betriebsmittel sind nicht möglich!*

- gemeinsame Betriebsmittel \leadsto implizieren Synchronisation
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

⚡ I4Copter: mehrere Sensoren am selben SPI-Bus

Rangordnung *komplexe Aufgaben können nicht geteilt werden!*

- eine komplexe Aufgabe wird in mehrere, einfachere Aufgaben aufgeteilt, die kooperativ einen Dienst zur Verfügung stellen
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

⚡ I4Copter: Datenverarbeitung in Filter, Fusion und Regelung trennen

Kommunikation *Aufgaben können nicht synchron kommunizieren!*

- synchroner Nachrichtenversand/-empfang
- Aufgaben sind nicht mehr unabhängig

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 5 Zusammenfassung

Ereignisorientierte Einplanung

(engl. *event-driven scheduling*)

Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten, die zufällig auftreten und somit nicht vorhersehbar sind

- die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

Ereignisse haben Prioritäten, die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

feste Zuordnung \mapsto Ereignisverarbeitung/-auslöser

- gibt Arbeitsaufträgen eine **absolute Priorität**

variable Zuordnung \mapsto Ereignisverarbeitung

- gibt Arbeitsaufträgen eine **relative Priorität**

 auch: **prioritätsorientierte Einplanung** (engl. *priority-driven scheduling*)

Prioritätsorientierte Algorithmen

Klassifikation

Verfahren zur prioritätsorientierten Einplanung periodischer Jobs werden in zwei Gruppen eingeteilt:

feste Priorität (engl. *fixed priority* oder *static priority*)

- alle Jobs einer Task haben dieselbe Priorität
- d.h., die Taskpriorität ist relativ zu anderen Tasks fest, unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Jobs

\leadsto Prioritäten werden **statisch vor der Laufzeit an Aufgaben** verteilt

dynamische Priorität (engl. *dynamic priority*)

- die Jobs einer Task können verschiedene Prioritäten haben
- d.h., die Taskpriorität variiert relativ zu anderen Tasks, wenn Jobs ausgelöst bzw. beendet werden

\leadsto Prioritäten werden **dynamisch zur Laufzeit an Arbeitsaufträge** vergeben

Verfeinerte Klassifikation

Ein Frage der Betrachtungsebene...

Praxisrelevanz haben Verfahren, die den Jobs feste Prioritäten zuweisen

- die Zuweisung erfolgt jedoch zum Auslösezeitpunkt eines Jobs
 - wenn er ereignisbedingt auf die **Bereitliste** (engl. *ready list*) kommt
- einmal zugewiesen, bleibt die Priorität eines ausgelösten Jobs gleich
 - jedoch immer nur in Relation zu allen anderen Jobs auf der Bereitliste
- auf Jobebene sind die Prioritäten fest, auf Taskebene aber variabel

Konsequenz daraus: verschiedene Kategorien von Einplanungsalgorithmen

feste Priorität wie gehabt (S. 4-14)

dynamische Priorität auf Taskebene (engl. *task-level dynamic-priority*)

feste Priorität auf Jobebene (engl. *job-level fixed-priority*)

dynamische Priorität auf Jobebene (engl. *job-level dynamic-priority*)

 **dynamische Priorität** \mapsto dynamisch auf Task- und fest auf Jobebene

Ereignisorientierter Planer

(engl. *event-driven scheduler*)

Einplanung ereignisbedingt ausgelöster Arbeitsaufträge resultiert in eine **dynamische Datenstruktur** \mapsto „sortierte Liste“

- der Vorgang ist gekoppelt mit der Einlastung: **online scheduling**
- kritisch ist die **Berechnungskomplexität** und wann sie anfällt
 - konstant oder variabel, dann jedoch mit oberer Schranke \mapsto WCET
 - zum Auslöse- oder Auswahlzeitpunkt von Arbeitsaufträgen

Sortierschlüssel (engl. *sort key*) zur Reihung eines Arbeitsauftrags ist die ihm zugeordnete Priorität

- ergibt sich ggf. erst zum Ereigniszeitpunkt aus der Priorität der von ihm zu verarbeitenden **Klasse von Ereignissen**
- ist eindeutig abzubilden auf einen endlichen Wertebereich

 auch: **prioritätsorientierter Planer** (engl. *priority-driven scheduler*)

Berechnungskomplexität

Zeitpunkte ihrer Wirksamwerdung

Auslösezeitpunkt (nach dem Ereigniszeitpunkt)

- konstanter Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
 - Jobs durch indizierte Adressierung in die Tabelle aufnehmen
 - ggf. ist ein Tabelleneintrag eine Jobliste (FCFS) gleicher Priorität
- (beschränkter) linearer Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
 - Vorabwissen zur **WCET des Sortiervorgangs** ist gefordert

Auswahlzeitpunkt (nach dem Auslöse-, vor dem Einlastungszeitpunkt)

- nahezu konstanter Aufwand, im Falle einer Ablaufliste
 - Jobs vom Kopf her der (ggf. einfach verketteten) Liste entnehmen
- beschränkter linearer Aufwand, im Falle einer Ablauftabelle
 - Vorabwissen zur **WCET des Suchvorgangs** ist gefordert
 - Tabelleneinträge können leer sein und sind zu überspringen

Berechnungskomplexität (Forts.)

Ablaufliste vs. Ablauftabelle

Ablaufliste

```

Job *list = 0;

void release(Job *item) {
    Job* last = 0;
    Job* tail = list;

    while(tail && outrank(tail,item))
        tail = (last = tail)->next;

    if(!last) {
        item->next = list; list = item;
    } else {
        item->next = tail; last->next = item;
    }
}

Job* extract() {
    Job* item;
    if((item = list)) list = item->next;
    return item;
}
    
```

release $O(n)$

extract nahezu $O(1)$

Ablauftabelle

```

Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
    assert((priority(item) >= 0)
        && (priority(item) <= Jobs - 1));
    item->state = Ready;
}

Job* extract() {
    for(unsigned slot = 0; slot < Jobs; slot++)
        if(table[slot]->state == Ready) {
            table[slot]->state == Selected;
            return table[slot];
        }
}

return 0;
}
    
```

release $O(1)$

extract $O(n)$, **obere Schranke** Jobs

Multi-Level-Queue-Scheduler, MLQ-Scheduler

Häufig anzutreffende Sonderform der Ablauftabelle

- eine Ablaufliste je Priorität, organisiert als **FIFO**
- Ablauflisten werden in einer Ablauftabelle verwaltet

Multi-Level-Queue

```

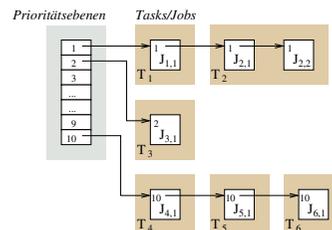
Job* table[Jobs];

void release(Job *item) {
    assert((prio(item) >= 0)
        && (prio(item) <= Jobs - 1));
    item->state = Ready;
    append(table[prio(item)], item);
}

Job* extract() {
    for(unsigned slot = 0; slot < Jobs; slot++)
        if(!empty(table[slot])) {
            Job *item = head(table[slot]);
            item->state == Selected;
            return item;
        }
}

return 0;
}
    
```

- mehrere Tasks pro Priorität
- mehrere Jobs pro Task
- Reihenfolge der Aulösung



Feste/Dynamische Prioritäten und Ablauftabellen/-listen

Welche Datenstrukturen bieten sich für die Umsetzung jeweils an?

Ablauf Tabellen haben eine statische Struktur

- Prioritäten werden fest auf Tabellenindizes abgebildet
- ~ das Prioritätsgefüge ist zur Laufzeit unveränderbar
 - es werden absolute Prioritäten von Aufgaben verwaltet
- ~ Eignung für die Implementierung **fester Prioritäten**

Ablauf Listen haben eine dynamische Struktur

- Prioritäten entsprechen der Position innerhalb der Ablaufliste
- ~ das Prioritätsgefüge passt sich zur Laufzeit an
 - Prioritäten werden relativ zu anderen Arbeitsaufträgen verwaltet
- ~ Eignung für die Implementierung **dynamischer Prioritäten**
 - auch andere dynamische, (partiell) sortierte Datenstrukturen sind hier denkbar, z.B. binäre Haufen (engl. *binary heap*)

Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler

!?

Die Tücke liegt oft im Detail...

Jobauslösung mit **konstantem Aufwand**, $O(1)$, ist möglich, sofern gilt:

- 1 der Ablaufplan ist eine auf mehrere Prioritätsebenen aufgeteilte dynamische Datenstruktur, repräsentiert als Tabelle von...
 - Wartelisten \leadsto LIFO
 - Warteschlangen \leadsto FIFO
- 2 alle Jobs, die über denselben Tabelleneintrag erfasst werden, besitzen auch dieselbe Priorität \leadsto **Prioritätsschlange**
 - sonst könnte LIFO/FIFO **Prioritätsverletzung** zur Folge haben
- 3 die Anzahl der Tabelleneinträge entspricht mindestens der Anzahl statisch zugewiesener Prioritäten
 - ggf. werden dann nahezu alle Tabelleneinträge nur einen Job erfassen
 - hängt ab von der Echtzeitanwendung und dem Einplanungsverfahren

Jobauswahl ist unter diesen Bedingungen nicht in $O(1)$ möglich:

- begrenzt viele leere Tabelleneinträge sind ggf. zu überspringen

Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler (Forts.)

!?

Eine Abwägungsfrage...

Vorrangsteuerung ist mit einem grundsätzlichen Konflikt konfrontiert:

- **entweder** Jobauslösung **oder** Jobauswahl mit $O(1)$ zu versehen
 - beides zugleich geht nicht

... für **Jobauslösung in $O(1)$** spricht:

- ereignisgesteuerte Einplanung/Einlastung benötigen konstante Zeit
 - als Folge eines *Interrupts* oder der Zustellung eines „Zeitsignals“
 - bedeutsam für voll-verdrängbare (engl. *full preemptive*) Systeme
- ereignisbedingte Jobverzögerungen lassen sich exakt bestimmen

... für **Jobauswahl in $O(1)$** spricht:

- der Übergang zum jew. nachfolgenden Job benötigt konstante Zeit
 - wenn z.B. der aktuelle Job durchgelaufen ist oder blockiert

Linux 2.6, Mach, QNX, ..., VxWorks verhelfen Jobauslösung zu $O(1)$

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 5 Zusammenfassung

Die „Busy Loop“

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?

Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;

    while(1) {
        warte_durchlauf();

        kontrolle_start();
        aufgabe1();
        kontrolle_stop();

        if(counter % 2 == 0) {
            aufgabe2_1();
        }

        10ms_nach_aufgabe1();

        if(counter % 2 == 0) {
            aufgabe2_2();
        }

        cnt++;
    }

    return 0;
}
```

- längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
 - die Schleife definiert einen **Rahmen**
 - \leadsto ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
 - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**
- Schwierige Spezifikation **zeitlichen Versatzes**
 - Abhängigkeit von der **tats. Ausführungszeit**
- Konflikte durch **lange andauernde Jobs**
 - evtl. ist eine **manuelle Aufteilung** nötig
- **Überwachung** der Ausführungszeit
 - schwieriger **Abbruch** des betroffenen Jobs

Arbeitsaufträge mit strikten Terminen

Alle Parameter der Arbeitsaufträge sind im Voraus bekannt

Vorabwissen bahnt den Weg, um Ablaufpläne *off-line* erstellen zu können

- alle Programme sind determiniert, das System ist deterministisch

statischer Ablaufplan \mapsto exakter Jobfahrplan; enthält feste Angaben darüber, wann welche Arbeitsaufträge auszuführen sind

- die jedem Arbeitsauftrag zugeteilte Prozessorzeit ist gleich seiner maximalen Ausführungszeit \sim WCET
- Einlastung der Arbeitsaufträge geschieht streng nach Fahrplan
 - alle Termine werden im Normalfall sicher eingehalten
 - unvorhergesehene Ausnahmen² führen zu Terminüberschreitungen
- da die Einplanung *off-line* geschieht, können Algorithmen mit hoher Berechnungskomplexität zum Einsatz kommen

²Gemeint sind hier die synchronen Programmunterbrechungen (d.h., *Traps*), z.B. aufgrund von Berechnungs- und/oder Adressierungsfehlern.

Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Tabellengesteuerte Einlastung von Arbeitsaufträgen

Repräsentation vorberechneter (statischer) Ablaufpläne \sim **Tabelle**

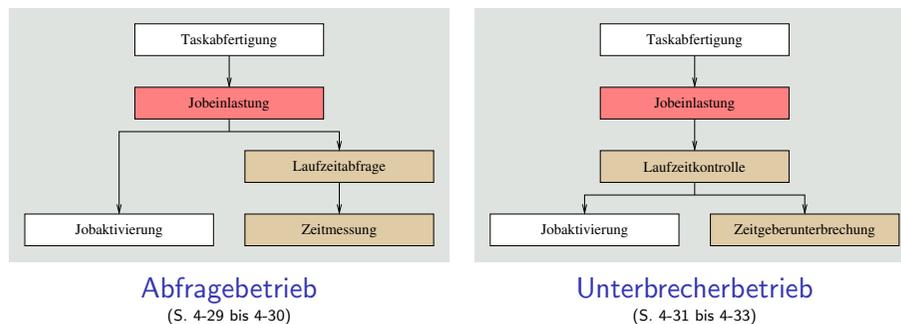
- jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
- bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
 - „Kurzzeitwecker“ auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
 - einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
- ein **Zeitgebersignal** schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

Reihumverfahren: am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- **zyklischer Ablaufplan** (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben

Abfertigung von Arbeitsaufträgen

Abfragebetrieb (engl. *polling mode*) vs. Unterbrecherbetrieb (engl. *interrupt mode*)



Benutzthierarchie

Die Benutzbeziehung [3] in einer funktionalen Hierarchie drückt Abhängigkeiten von der Verfügbarkeit korrekter Implementierungen von Funktionen aus. *A benutzt B*, wenn die korrekte Ausführung von *B* zwingend ist für die Korrektheit von *A*: d.h., die Korrektheit von *A* hängt ab von der Korrektheit von *B* (*A* liegt über *B*).

Tabellengesteuerte Einlastung zyklischer Arbeitsaufträge

Taskabfertigung: Grundsätzliche Verfahrensweise

erledige Dispatcher (Ablaufabelle, Tabellenlänge):

setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablaufabelle;

solange der Betrieb läuft **tue**

erledige

laste Ablaufabelle[Laufzähler].Arbeitsauftrag ein;

wenn Laufzähler < Tabellenlänge **dann** erhöhe Laufzähler um 1

sonst setze Laufzähler auf ersten Eintrag der Ablaufabelle;

basta;

basta.

Einlastung der Arbeitsaufträge verläuft in drei grundsätzlichen Schritten:

- 1 Laufzeitüberwachung des anstehenden Arbeitsauftrags aufsetzen
- 2 anstehenden Arbeitsauftrag starten und ausführen
- 3 sich auf den nächsten Entscheidungszeitpunkt **synchronisieren**

Synchronisation durch Abfrage eines Taktzählers

Jobeinlastung, Laufzeitabfrage und Zeitmessung

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
 interpretiere Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt als Taktzahl;
 aktiviere Arbeitsauftrag;
solange Taktzähler < Taktzahl **tue** nichts;
basta.

Grundlage bildet ein **Taktzähler** (engl. *clock counter*) in der Hardware

- der Entscheidungszeitpunkt muss als Taktzahl vorliegen oder in eine Taktzahl umgerechnet werden können
 - diese Taktzahl wird nach Beendigung des Arbeitsauftrags abgewartet
- gezählt werden z.B. die CPU-Takte bei Befehlsausführung

 Verzögerung von Arbeitsaufträgen kann Spätfolgen nach sich ziehen

Abfragebetrieb im Rückblick

Verzögerungsproblematik bei Taktzähler und Zeitkontrolle

Abtastung des Zeitgebers durch das **im Vordergrund** laufende Programm

- nachdem ein aktivierter Arbeitsauftrag komplett durchgelaufen ist
 - Arbeitsaufträge erhalten einen gewissen Vertrauensvorschuss
 - evtl. Terminüberschreitungen werden erst im Nachhinein erkannt
- schwache/strikte Echtzeitfähigkeit liegt ganz in Anwendungshand **schwach** bei Terminüberschreitung, Ergebnis findet Verwendung
 - der nachfolgende Arbeitsauftrag startet verspätet
 - als Folge kann das System komplett aus den Takt geraten **strikt** sonst, d.h., wenn Termineinhaltung jederzeit garantiert ist
- die WCET muss die Behandlung evtl. Fehlersituationen einschließen

 Alternative: **Zeitgeberunterbrechung** (engl. *timer interrupt*)

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber

Jobeinlastung: Einseitige Synchronisation mit Zeitgeberunterbrechung

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
 stelle Zeitgeber ein auf Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt;
 kontrolliere Arbeitsauftrag;
solange Zeitgebersignalmarke ungesetzt ist **tue** nichts;
 setze Zeitgebersignalmarke zurück;
basta.

Anzeige des Zeitgebersignals durch ein **im Hintergrund** arbeitendes Gerät

- Ausführungsfreigabe durch **Softwaresignal** der Behandlungsroutine
 - hier: die Zeitgebersignalmarke, die beim Konsumieren gelöscht wird
 - der *Dispatcher* synchronisiert sich mit dem Zeitgeber
- Abbruch des Arbeitsauftrags als Folge einer Zeitgeberunterbrechung
 - sofern der Arbeitsauftrag dann noch in Ausführung befindlich war
 - ist in Bezug auf die WCET des Arbeitsauftrags ein Ausnahmefall

Synchronisation durch unterbrechenden Zeitgeber (Forts.)

Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Bedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:
wenn Arbeitsauftrag.Zustand = laufend **dann** breche Arbeitsauftrag ab;
 setze Zeitgebersignalmarke;
basta.

Erfüllung der Wartebedingung für den (aktiv wartenden) *Dispatcher*

- ggf. Abbruch eines seinen Termin überschreitenden Arbeitsauftrags

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):
 setze Arbeitsauftrag.Zustand auf laufend;
 aktiviere Arbeitsauftrag;
 setze Arbeitsauftrag.Zustand auf beendet;
basta.

„Schönheitsfehler“:

- Zustand
- Signalmarke
- unnötiger *Interrupt*

Synchronisation durch unterbrechende Zeitkontrolle

Jobeinlastung, Laufzeitkontrolle, Zeitgeberunterbrechung: Unbedingter Jobabbruch

erledige Behandlungsroutine zum *Timer Interrupt*:
 breche Arbeitsauftrag ab;
basta.

erledige kontrolliere (Arbeitsauftrag):
 lasse Unterbrechung durch Zeitkontrolle zu;
 aktiviere Arbeitsauftrag;
 wehre Unterbrechung durch Zeitkontrolle ab;
basta.

Ausnahmefall die
 Zeitkontrolle läuft
 bei Überschreitung
 der WCET des
 Arbeitsauftrags ab

erledige laste ein (Arbeitsauftrag):
 richte Zeitkontrolle aus auf Arbeitsauftrag. Entscheidungszeitpunkt;
 kontrolliere Arbeitsauftrag;
solange Zeitkontrolle $\neq 0$ **tue** nichts;
basta.

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Mischung aus lang andauernden und häufig wiederkehrenden Jobs unterstützen

Batch Processing führt einen Job nach dem anderen aus

- lang andauernde Jobs verzögern kurze, häufig wiederkehrende Jobs
- ~ diese Jobs verpassen u.U. deshalb ihre Termine
 - oder lange andauernde Jobs werden in handliche „Happen“ zerteilt

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen erlaubt Verdrängung

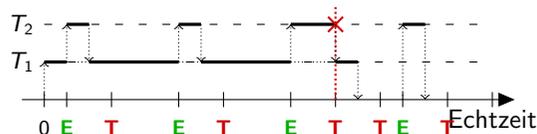
- der eingelastete Job verdrängt den aktuell ausgeführten Job
- der ausgeführte Job wird nicht abgebrochen
- ~ mehrere *kurze* Jobs **während** eines *langen* Jobs ausführen
- die Kontrolle des ausgeführten Jobs wird schwieriger
 - ein Entscheidungszeitpunkt ermöglicht die Einlastung **oder** die Kontrolle eines Jobs, **beides zugleich ist i.A. nicht möglich**
 - die Ausführungszeit eines Jobs muss explizit protokolliert werden
 - alternativ wird eine **Terminüberwachung** statt einer Laufzeitkontrolle durchgeführt (z.B. OSEKtime [2])

Stapelbasierte Abarbeitung von Ablauftabellen

Beispiel – $T_1 = (20, 10, 15, 0)$, $T_2 = (5, 1, 2, 1)$

mögliche Ablauftabelle:

Typ	Aufgabe	Zeit
E	T_1	0
E	T_2	1
T	T_2	3
E	T_2	6
T	T_2	8
E	T_2	11
T	T_2	13
T	T_1	15
E	T_2	16
T	T_2	18



- $t = 0$ T_1 einlasten
- $t = 1, 6, 11$ T_2 einlasten, T_1 verdrängen
- $t = 2, 7$ T_2 terminiert, T_1 fortsetzen
- $t = 13$ T_2 verfehlt seinen Termin
 ~ Ausnahme auslösen, T_2 abbrechen
- $t = 14$ T_1 terminiert
- $t = 16$ T_2 einlasten
- $t = 17$ T_2 terminiert

Gliederung

- 1 Überblick
- 2 Periodische Aufgaben
 - Zeitparameter periodischer Aufgaben
 - Periodische Echtzeitanwendungen
 - Restriktionen
- 3 Ereignisgesteuerte Ausführung
 - Feste und dynamische Prioritäten
 - Ereignisorientierter Planer
 - Berechnungskomplexität
- 4 Zeitgesteuerte Ausführung
 - Naive Implementierung
 - Ablauftabellen
 - Einlastung und Laufzeitkontrolle
 - Stapelbasierte Ablaufplanung
- 5 Zusammenfassung

Resümee

Periodische Aufgaben haben in Echtzeitsystemen eine weite Verbreitung

- Periode, Phase, Hyperperiode, digitale Kontrollschleife
- Restriktionen periodischer Aufgaben und ihre Einschränkungen

Ereignisgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

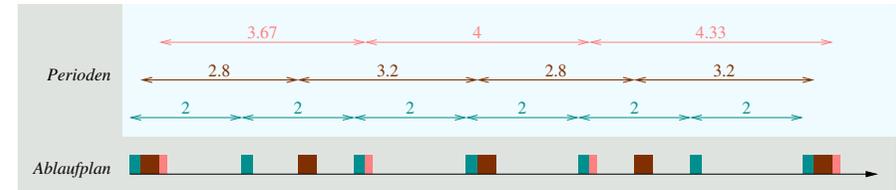
- Ereignis- bzw. prioritätsorientierte Einplanung
- Feste und dynamische Prioritäten auf Task- bzw. Job-Ebene
- Auslösung vs. Auswahl, Ablaufliste vs. Ablauftabelle
- *Multi-Level-Queue-Scheduler*, Prioritätsorientierter $O(1)$ -Scheduler

Zeitgesteuerte Ausführung periodischer Aufgaben

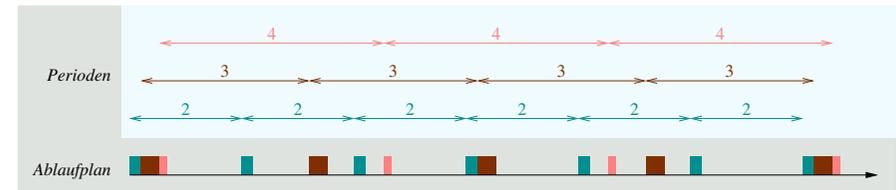
- naive „*Busy Loop*“-Implementierung und Ablauftabellen
- Laufzeitkontrolle im Abfrage- und Unterbrecherbetrieb
- stapelbasierte Ablaufplanung

Genauigkeit periodischer Aufgaben

Einfluss der Einplanung auf Schwankungen in der Einlastung



- bis auf Periode 2 sind alle anderen Jobs nicht wirklich periodisch



- alle Jobs laufen wirklich periodisch ab: Jobabstand = Periode

Literaturverzeichnis

- [1] LIU, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Prentice-Hall, Inc., 2000. –
ISBN 0-13-099651-3
- [2] OSEK/VDX GROUP:
Time Triggered Operating System Specification 1.0 / OSEK/VDX Group.
2001. –
Forschungsbericht. –
<http://portal.osek-vdx.org/files/pdf/specs/ttos10.pdf>
- [3] PARNAS, D. L.:
Some Hypotheses About the "Uses" Hierarchy for Operating Systems / TH Darmstadt.
1975 (BS I 75/2). –
Forschungsbericht