

Echtzeitsysteme

Rekapitulation

Lehrstuhl Informatik 4

2. Februar 2012

Gliederung

1 Rückblick

- II Einleitung
- III-1 Objekt \leftrightarrow Rechensystem
- III-2 Struktureller Aufbau
- IV-1 Abarbeitung periodischer EZS
- IV-2 Ereignisgesteuerte Ablaufplanung
- IV-3 Zeitgesteuerte Ablaufplanung
- V-1 Grundlegende Abfertigung nicht-periodischer EZS
- V-2 Zustellerkonzepte
- VI Rangfolge
- VII Zugriffskontrolle
- VIII Verteilte Echtzeitsysteme

II Einleitung

Historischer Bezug von SAGE bis in die Gegenwart

- von hardware-lastigen, auf militärische Zwecke zugeschnittene Spezialsysteme hin zu software-geprägten Alltagsgegenständen

Echtzeitbetrieb eines Rechensystems in seiner Umgebung

- Operateur, **Echtzeitrechensystem**, **kontrolliertes Objekt**

Echtzeitbetrieb bedeutet **Rechtzeitigkeit**

- Ereignisse, **Ergebnisse** und **Termine**
- **schwache**, **starke** oder **strikte** Echtzeitbedingungen
- weiche vs. feste vs. harte Echtzeitsysteme

Gewährleistung der Rechtzeitigkeit als Herausforderung

- **Determiniertheit** und **Determinismus**
- **rein zyklischer** vs. **asynchroner/nicht vorhersagbarer Betrieb**

Abgrenzung des Vorlesungsstoffes

- **Rechtzeitigkeit**, nicht **Verlässlichkeit**

III-1 Physik. Objekt ↔ Kontrollierendes Rechensystem

Fallbeispiel Quadrokopter das physikalische Objekt

- hat Objektdynamik \mapsto Zeitparameter d^{object} , d^{rise}
- ~ zeitliche Ausrichtung des kontrollierenden Rechensystems
 - Abtastperiode f^{sample} , Latenz d^{cpu} , Totzeit d^{dead}

Lageregelung ist nur ein kleiner Teil des kontrollierenden Rechensystems

- Sensoren \rightarrow Mikrocontroller \rightarrow Betriebssystem \rightarrow Anwendung
- Anwendung \rightarrow Betriebssystem \rightarrow Mikrocontroller \rightarrow Aktoren
- ~ alles trägt zur Latenz d^{cpu} bei

Programmunterbrechung in synchroner oder asynchroner Ausprägung

- Zustandssicherung, Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls
- **Interrupts** machen determinierte Programme nicht-deterministisch
 - nicht zu jedem Zeitpunkt ist bestimmt, wie weitergefahren wird
- Unvorhersagbarkeit, Überlast, Verzögerung, . . . , Nebenläufigkeit
- ~ Wie detailliert muss man diese Vorgänge betrachten?

III-2 Struktureller Aufbau von Echtzeitanwendungen

Strukturelle Elemente einer Echtzeitanwendung

- Ereignisse — event-trigger und time-trigger
- einfache, komplexe Aufgaben und Arbeitsaufträge
- Aufgabe vs. Arbeitsauftrag vs. Faden

Ablaufsteuerung \mapsto Strategie & Mechanismus

- zweiphasiger Prozess: statische und dynamische Abbildung
- Verwaltungsallgemeinkosten dynamischer Ablaufsteuerung
- Einplanung ist die Strategie, Einlastung ist der Mechanismus

Arbeitsweise ist zeit- oder ereignisgesteuert: Einplanung & Einlastung

- entkoppelt im zeitgesteuerten System (Taktsteuerung)
- gekoppelt im ereignisgesteuerten System (Vorrangsteuerung)

Zeitparameter sind Punkte und Intervalle auf der Echtzeitachse

- (sporadische) Auslösezeit, (absoluter) Termin
- Latenz, Antwortzeit und Schlupfzeit

Planbarkeit Problemstellung und Optimalität

IV-1 Abarbeitung periodischer Echtzeitsysteme

Periodische Aufgaben genügen für viele Echtzeitanwendungen

- Periode, WCET, relativer Termin, Phase, Hyperperiode
- Restriktionen des periodischen Aufgabenmodells
- viele Anwendungsfälle kommen mit rein periodischen Aufgaben aus

Ereignisgesteuerte Abarbeitung periodischer Aufgaben

- feste und dynamische Prioritäten auf Job- bzw. Task-Ebene

Einplanung \mapsto ereignis-, vorrang-, prioritätengesteuert

- Einplanungsaufwand: Auslöse- vs. Auswahlzeitpunkt von Jobs
- Ablauftabellen, Ablafliste, Multi-Level-Queue

Zeitgesteuerte Abarbeitung periodischer Aufgaben

- Probleme einer naiven *Busy-Loop*-Implementierung
- Vorabwissen ermöglicht die Bestimmung statischer Ablaufpläne

Einlastung und Laufzeitkontrolle im Abfrage- oder Unterbrecherbetrieb

- Taktzähler, Zeitgeber, Zeitkontrolle
- stapelbasierte Abarbeitung statischer Ablauftabellen

IV-2 Ereignisgesteuerte Ablaufplanung periodischer EZS

Gebräuchliche Verfahren mit statischen und dynamischen Prioritäten

- statisch: RM, DM, dynamisch: EDF, LRT, LST

Prioritätsabbildung mangels Systemprioritäten bzw. Prioritätsebenen

- gleichmäßig oder ungleichmäßig, *constant ratio mapping*
- Einfluss auf die Planbarkeit (engl. *schedulability*) eines Systems

Optimalität und Nicht-optimalität der vorgestellten Verfahren

- Nicht-optimalität von statischen Prioritäten und Vorrangsteuerung

Planbarkeitsanalyse für ereignisgesteuerte Ablaufplanung

- CPU-Auslastung und Antwortzeitanalyse
- Komplexität der Problemstellung
- Notwendige und/oder hinreichende Planbarkeitskriterien

IV-3 Zeitgesteuerte Ablaufplanung periodischer EZS

Integration der Ablaufplanung in den Entwicklungsprozess

- Integration vs. Spezifikation des Zeitverhaltens

Struktur zyklischer Ablaufpläne \rightsquigarrow „gute Anordnung“, Determinismus

- bevorzugter Ansatz bei „manueller Ablaufplanung“
- Rahmen, Rahmenlänge, Scheiben; *major/minor cycle*
- Überwachungsfunktion: Auslösung und Zeitüberschreitung

Algorithmische Bestimmung statischer Ablauftabellen

- ... wenn eine manuelle Ablaufplanung nicht in Frage kommt
- List-Scheduling: b-Level und t-Level, z.B. HLFET, ISH, DLS, ...
- Branch&Bound-Prinzip: erschöpfender Suche, optimale Verfahren

Betriebswechsel entflechten die Ablauftabelle des schlimmsten Falls

- erfordern ein systemweit koordiniertes Vorgehen
- \rightsquigarrow Tabellenwechsel, Betriebsmittelfreigabe/-anforderung, Nachladen

V-1 Grundlegende Abfertigung nicht-periodischer EZS

Nicht-periodische Aufgaben unterstützen interaktive Anwendungen

- minimale Zwischenankunftszeit, WCET, Termin
- aperiodische und sporadische Aufgaben; Übernahmeprüfung

Periodische Zusteller behandeln periodisch nicht-periodische Aufgaben

- Ausführungsbudget, Auffüllperiode, Auffüllzeit, Auftragsüberhang

Abfragende Zusteller verlieren ihr Ausführungsbudget bei Untätigkeit

- hohe Antwortzeiten, Überlast durch hochfrequentes Abfragen

Unterbrecherbetrieb behandeln nicht-periodische Ereignisse **sofort**

- zu Lasten der Termintreue periodischer Aufgaben

↪ nur als kontrollierter Unterbrecherbetrieb verwendbar

Hintergrundbetrieb nutzt den Schlupf periodischer Aufgaben

- schlechte Antwortzeiten, keine Beeinflussung periodischer Aufgaben

Slack-Stealing ↪ Kompromiss: Unterbrecher- und Hintergrundbetrieb

- Verdrängung, solange noch Schlupf verfügbar ist
- einfach bei Taktsteuerung, zu komplex für Vorrangsteuerung

V-2 Zustellerkonzepte und Übernahmeprüfung

Bandweite-bewahrende Zusteller geben ihr Ausführungsbudget nicht auf

- Verbrauchs- und Auffüllregeln des Ausführungsbudgets
- schiebbarer Zusteller, SpSL Sporadic Server

POSIX Sporadic Server \mapsto Implementierung des SpSL Sporadic Server

- Spezifikation ist defekt
- Anhäufung und verfrühte Auffüllung des Ausführungsbudgets
- unzureichende zeitliche Isolation

Übernahmeprüfung sporadischer Aufgaben

- dichte-basierter Akzeptanztest für nach EDF geplante Systeme
- schlupf-basierter Akzeptanztest mithilfe sporadischer Zusteller

VI Rangfolge

Rangfolge mündet in **gerichteten Abhängigkeiten**

- **Datenabhängigkeiten** \mapsto Erzeuger-Verbraucher-Beziehung
- Beispiel: Datenabhängigkeiten im I4Copter
- notiert in Abhängigkeits- bzw. Aufgabengraphen

Koordinierung gerichteter Abhängigkeiten

- analytische durch Einplanung, konstruktiv durch Kooperation

Umsetzung gerichteter Abhängigkeiten in Echtzeitanwendungen

- Beispiel: byte-weiser Empfang von Nachrichten
- statische Anordnung im Quellcode

analytische Koordinierung \mapsto geeignete Anordnung in einer Ablaufabelle

konstruktive Koordinierung \mapsto Interprozesskommunikation

- direktes Aktivieren/Erzeugen von Ausführungssträngen
- konsumierbare Betriebsmittel: Semaphore, Nachrichten, ...

Ablaufplanung berücksichtigt gerichtete Abhängigkeiten

- Anpassung von Auslösezeit und Terminen

VII Zugriffskontrolle

Konkurrenz und Koordination nebenläufiger Aktivitäten

- Nebenläufigkeit, Kausalität, Kausalordnung
- Konfliktsituationen \leadsto **synchronisieren ohne Prioritätsumkehr**

Verdrängungssteuerung \mapsto verdrängungsfreie kritische Abschnitte

- benötigt kein *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- pragmatisch/effektiv, beeinträchtigt unabhängige Jobs

Prioritätsvererbung \mapsto Priorität zeitweise erhöhen

- benötigt kein *à priori* Wissen
- direkte Blockierung, Blockierung durch Vererbung; transitiv

Prioritätsobergrenzen \mapsto Priorität zeitweise deckeln

- benötigt *à priori* Wissen; Verklemmungsvorbeugung
- Grundmodell vs. (einfachere) stapelorientierte Variante

Ablaufplanung berücksichtigt Blockadezeiten

- Verzicht auf den Prozessor ermöglicht wiederholte Blockierung

VIII Verteilte Echtzeitsysteme

Erscheinungsform \mapsto **verteiltes Echtzeitrechensystem**

- Orientierung an der Verteilung des physikalischen Objekts
- Beherrschung von Komplexität, Erhöhung der Rechenleistung

Anforderungen an verteilte Echtzeitrechensysteme

- **Zusammensetzbarkeit** \mapsto Kompositionsproblem, Gerätegruppen
- **Skalierbarkeit** \mapsto Erweiterbarkeit (auch Schrumpfung), Komplexität
- **Verlässlichkeit** \mapsto Fehlereingrenzung, Replikation

Aufbau verteilter Echtzeitrechensysteme

- Knotenrechner, **Netzwerkschnittstelle**, **Kommunikationssteuerung**
- **externe vs. autonome Kontrolle**; **Ereignis-** vs. **Zustandsnachrichten**
- Netzübergangsknoten, Netzwerktopologien, Netzwerkföderation

Kommunikationssysteme für verteilte Echtzeitsysteme

- **Kapselung des Zeitverhaltens**, Verpflichtungen der Klienten
- **Ereignis- vs. Zeitsteuerung**, explizite vs. implizite **Flusskontrolle**
- Netzzugangsprotokolle: CSMA/CR vs. TDMA

VII & X Exkurs: NB Synchronisation & WCET-Analyse

Probleme blockierender Synchronisation \mapsto siehe VII Zugriffskontrolle

\rightsquigarrow Verzicht auf die Blockierung!

nichtblockierende Synchronisation \mapsto der Prozessor hilft uns!

- Spezialinstruktionen: TAS, FAA, CAS oder CMPXCHG
- „Bauschema“ für nichtblockierende Synchronisation mit CAS
- Fallstudie: nichtblockierend synchronisierter Stapel

Fortschrittsgarantien oder „Dauert es noch lange?“

- Behinderungs-, Sperr- und Wartefreiheit

WCET-Analyse \rightsquigarrow „Die Suche nach dem e!“

- WCET ist unverzichtbare Eingabe für die Planbarkeitsanalyse
- Programmiersprachenebene vs. Maschinenprogrammzebene
- Flussanalyse vs. „Instruktionenzählen für Fortgeschrittene“
- Beispiel: LRU Cache-Analyse