Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Phillip Raffeck, Florian Schmaus, Simon Schuster

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
https://www4.cs.fau.de

Sommersemester 2019

Überblick

Annahmen

- C99
- x86 bzw. x86-64, d. h.
  - vorzeichenbehaftete Integer als Zweierkomplement implementiert
  - `char` hat 8 Bit
  - `short` hat 16 Bit
  - `int` hat 32 Bit
  - `long` hat 32 Bit auf x86 und 64 Bit auf x86-64

Frage 3

Angenommen: `int x = 1;` Zu was wird `(unsigned short)x > -1` ausgewertet?

1. 0
2. 1
3. nicht definiert

Erklärung

- vor dem Vergleich beide Operanden nach `int` umgewandelt
- weil dies ohne Wertverlust geschehen kann

⇝ hier werden zwei `signed`-Werte verglichen

⇝ ein `unsigned int` würde nicht umgewandelt werden!

Frage 4

Zu was wird `-1L > 1U` auf x86-64 ausgewertet? Auf x86?

1. beides `0`
2. beides 1
3. `0` auf x86-64, 1 auf x86
4. 1 auf x86-64, `0` auf x86

Erklärung

- auf x86-64 ist `int` kürzer als `long`

↝ `unsigned int` wird zu `long` ↝ `-1L > 1L` ⇒ `0`

- auf x86 entspricht `int` dem Datentyp `long`

↝ `UINT_MAX > 1U` ⇒ 1

Frage 5

Zu was wird `SCHAR_MAX == CHAR_MAX` ausgewertet?

1. `0`
2. `1`
3. implementation defined

Erklärung

- C99 schreibt nicht vor ob `char` vorzeichenbehaftet ist
- auf x86 und x86-64 ist `char` für gewöhnlich vorzeichenbehaftet

Frage 6

Zu was wird `UINT_MAX + 1` ausgewertet?

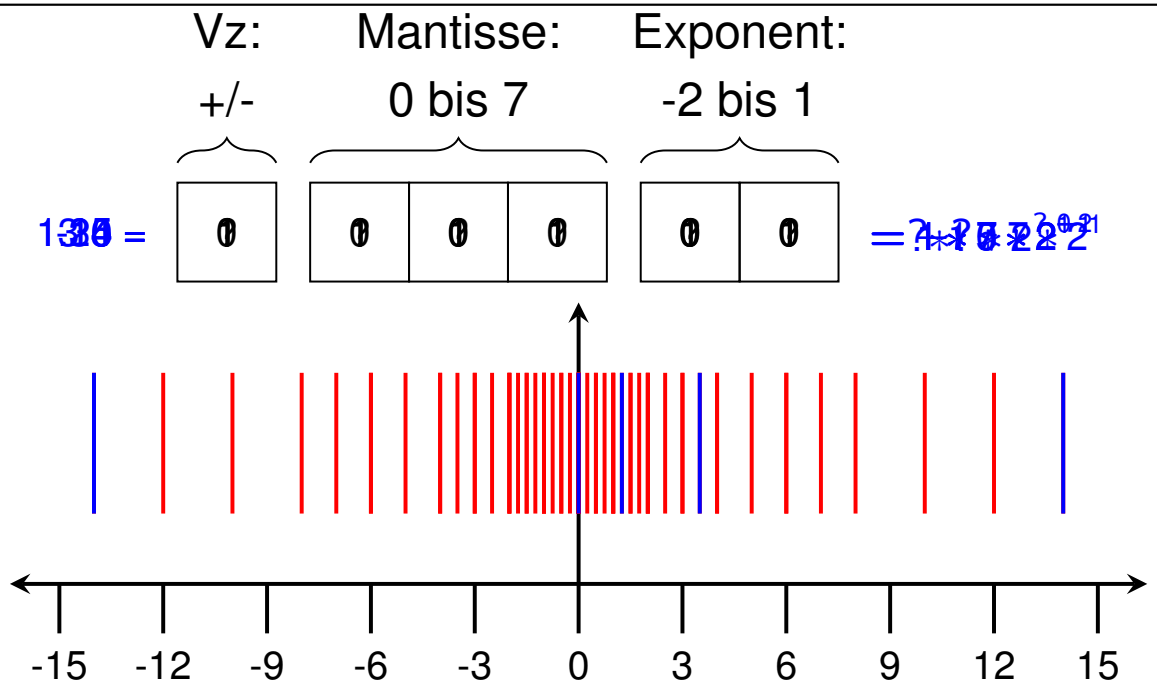
1. `0`
2. `1`
3. `INT_MIN`
4. `UINT_MIN`
5. nicht definiert

Erklärung

Der C-Standard garantiert, dass `UINT_MAX + 1 == 0`

Inhalt

Fließkommazahlen



IEEE 754

- Noch komplexer:
  - normalisierte/denormalisierte Darstellung
  - Rundung, Fehlersemantik, ...
  - NaN, ∞, ...
- `https://ieeexplore.ieee.org/document/4610935/`

Festkommaarithmethik – Motivation

```
float func(void){
  volatile float a = 23.42;
  volatile float b = 12.34;
  return a * b;
}
```

```
func:
  push  {r7, lr}
  sub   sp, #8
  add   r7, sp, #0
  ldr   r3, [pc, #28] ; float a
  str   r3, [r7, #4]
  ldr   r3, [pc, #28] ; float b
  str   r3, [r7, #0]
  ldr   r2, [r7, #4]
  ldr   r3, [r7, #0]
  adds  r0, r2, #0 ; Param 1
  adds  r1, r3, #0 ; Param 2
  bl    3a6c <__aeabi_fmul>
  adds  r3, r0, #0
  adds  r0, r3, #0
  mov   sp, r7
  add   sp, #8
  pop   {r7, pc}
```

- Setup
  - Plattform: ARM Cortex-M0+
  - Compiler: arm-gcc
- Funktion `__aeabi_fmul` : 300 Zeilen Assembler
- Keine Fließkommaeinheit (engl. floating-point unit, FPU) vorhanden
- Emulation der **Fließkommaarithmetik in Software**

Festkommaarithmetik – Q-Notation

- Kaum ein Mikrocontroller hat eine *Fließkommaeinheit*
- *Kein EAN* für Fließkommazahlen

  ⇝ *Festkommaarithmethik* mit Ganzzahlen
- Zahlenformat häufig in Q-Notation [2] angegeben
- *Qm.n* ⇝ Festkommazahl mit
  - m Bit vor dem Komma, n nach dem Komma, ein Vorzeichenbit
  - Wertebereich: $[-2^m, 2^m - 2^{-n}]$
  - Auflösung: 2^{-n}
- Implementierung für Übungsaufgabe *vorgegeben*

Implementierung als Integer

⇝ passendes Q-Format ist **anwendungsspezifisch**

Q-Notation – Beziehung zu Fließkommazahlen

von Fließkomma nach Qm.n

1. Multiplikation mit 2^n
2. Runden auf die nächste Ganzzahl

von Qm.n nach Fließkomma

1. Umwandlung in Fließkommazahl $\rightsquigarrow$ cast
2. Multiplikation mit 2^{-n}

Operationen – Addition/Subtraktion

- Addition und Subtraktion wie bei Ganzzahlen

Addition

```
1 int32_t       a = ...;
2 int32_t       b = ...;
3 int32_t result = a + b;
```

Subtraktion

```
1 int32_t       a = ...;
2 int32_t       b = ...;
3 int32_t result = a - b;
```

Operationen – Multiplikation/Division

- Braucht Zwischenergebnis von doppelter Bitbreite

Multiplikation

```
1 #define K    (1 << (n - 1))
2 int32_t      a = ...;
3 int32_t      b = ...;
4 int64_t  temp = (int64_t) a * (int64_t) b;
5          temp += K;
6 int32_t  result= temp >> n;
```

Division

```
1 int32_t       a = ...;
2 int32_t       b = ...;
3 int64_t    temp = (int64_t) a << n;
4            temp += b / 2;
5 int32_t  result = temp / b;
```

- Siehe Implementierung in `fixedpoint.c`
- Vorsicht: Rundungsfehler durch Transformationen

Inhalt

Ziele des Softwareentwurfs

Modifizierbarkeit: lokale Veränderbarkeit

- ⇝ Änderungen an Anforderungen umsetzbar
- ⇝ Fehler korrigierbar

Effizienz: optimaler Betriebsmittelbedarf

- wird häufig zu früh berücksichtigt

Verlässlichkeit: lange Zeit funktionsfähig ohne menschlichen Eingriff

- gutmütiges Ausfallverhalten
- muss von Anfang an eingeplant sein!

Verständlichkeit: Isolierung von

- Daten
- Algorithmen

Prinzipien des Softwareentwurfs

Abstraktion:	wichtige Details hervorheben
Kapselung:	unnötige Details verbergen
Einheitlichkeit:	konsistente Notation
Vollständigkeit:	alle wichtigen Aspekte berücksichtigt
Testbarkeit:	muss von Anfang an eingeplant werden

C macht es einem hier nicht leicht

$\leadsto$ **disziplinierte Herangehensweise** notwendig!

Fragestellung

Wie komme ich von der Beschreibung zur Software?

Objektorientierter/Objektbasierter Entwurf [1]

1. Identifiziere **Objekte** und deren Attribute
2. Identifiziere **Operationen** jedes Objekts
3. Lege **Sichtbarkeit** fest
4. Lege **Objektschnittstellen** fest
5. **Implementiere** Objekte

Beispielbeschreibung – α-Filter

- $\hat{x}[\kappa]$ Schätzung, α Filterparameter, $y[\kappa]$ Messwert
- Initialisierung: $\hat{x}[0] = 0$
- Filterschritt:

$$r[\kappa] = y[\kappa] - \hat{x}[\kappa - 1] \tag{1}$$

$$\hat{x}[\kappa] = \hat{x}[\kappa - 1] + \alpha \cdot r[\kappa] \tag{2}$$

- Optimale Parameter (σ_w^2 Prozessvarianz, T Abtastintervall, σ_v^2 Rauschvarianz):

$$\lambda = \sigma_w \cdot T^2 / \sigma_v \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + 16\lambda^2}}{8} \tag{4}$$

1. Objekte und Attribute identifizieren

- Herangehensweise:
  - **Hauptwortextraktion** aus Anforderungsdokument
  - für kleinere Probleme: *Intuition*
- Was ist das Objekt? $\leadsto$ **Filter**
- Attribute? Welche Information brauche ich für jeden Filterschritt?
  - Schätzung aus der Vorrunde $\hat{x}[\kappa - 1]$
  - Filterparameter α
  - aktuellen Messwert $y[\kappa] \leadsto$ kein Zustand, kommt von aussen

Vorläufige Objektschablone

```
1 typedef struct _Alpha_Filter {
2   AF_Value_t x;
3   AF_Value_t alpha;
4 } Alpha_Filter;
```

2. Operationen identifizieren

- Herangehensweise:
  - **Verbenextraktion**
  - für kleinere Probleme: *Intuition*
- Leben eines Objekts:
  1. Initialisierung $\leadsto$ Betriebsmittel anfordern
  2. Verwendung
  3. Beseitigung $\leadsto$ Betriebsmittel freigeben
- Was möchten Benutzer mit dem Filter machen?
  - Filter initialisieren
  - Filterschritt ausführen
  - Schätzwert erfragen
  - Betriebsmittelfreigabe nicht notwendig

3. Sichtbarkeit festlegen

- In modernen Programmiersprachen `private`, `public`, ...
- In C nur eingeschränkt möglich
  - modulintern vs. modulextern
- Leitfaden: möglichst wenig sichtbar machen

  ⇝ öffentliche Schnittstelle bedeutet Verpflichtung
- Was soll bei unserem Filter öffentlich sein?
  - Initialisierung
  - Filterschritt
  - Schätzung abfragen
- Alle anderen Operationen modulintern

  ⇝ Hilfsfunktionen `static`

4. Schnittstelle festlegen

- Zwischen Modul und Außenwelt
- Statische Semantik

Schnittstelle

```
1  void afilter_init(Alpha_Filter *filter,
2                    AF_Value_t process_variance,
3                    AF_Value_t noise_variance,
4                    AF_Value_t sampling_interval);
5
6  void afilter_step(Alpha_Filter *filter,
7                    AF_Value_t measurement);
8
9  AF_Value_t afilter_get_estimate(Alpha_Filter *filter);
```

5. Implementierung – Header

alpha_filter.h

```
1  #ifndef ALPHA_FILTER_H_INCLUDED
2  #define ALPHA_FILTER_H_INCLUDED
3
4  typedef float AF_Value_t;
5  typedef struct _Alpha_Filter {
6    AF_Value_t x;
7    AF_Value_t alpha;
8  } Alpha_Filter;
9
10 void afilter_init(Alpha_Filter *filter,
11                   AF_Value_t process_variance,
12                   AF_Value_t noise_variance,
13                   AF_Value_t sampling_interval);
14
15 void afilter_step(Alpha_Filter *filter,
16                   AF_Value_t measurement);
17
18 AF_Value_t afilter_get_estimate(Alpha_Filter *filter);
19 #endif // ALPHA_FILTER_H_INCLUDED
```

5. Implementierung – Initialisierung

$$\hat{x}[0] = 0 \tag{5}$$

$$\lambda = \sigma_w \cdot T^2 / \sigma_v \tag{6}$$

$$\alpha = \left(-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + 16\lambda^2}\right)/8 \tag{7}$$

alpha_filter.c

```
1  void afilter_init(Alpha_Filter *filter,
2                    AF_Value_t process_variance,
3                    AF_Value_t noise_variance,
4                    AF_Value_t sampling_interval) {
5    filter->x = 0;
6    AF_Value_t l = sqrt(process_variance)
7      * sampling_interval * sampling_interval
8      / sqrt(noise_variance);
9    filter->alpha = (-l*l
10     + sqrtf(l*l*l*l + 16.0f*l*l)) / 8.0f;
11 }
```

5. Implementierung – Filterschritt

$$r[\kappa] = y[\kappa] - \hat{x}[\kappa - 1] \tag{8}$$

$$\hat{x}[\kappa] = \hat{x}[\kappa - 1] + \alpha \cdot r[\kappa] \tag{9}$$

alpha_filter.c

```
1  void afilter_step(Alpha_Filter *filter,
2                    AF_Value_t measurement) {
3    AF_Value_t  r = measurement - filter->x;
4    filter->x = filter->x + filter->alpha * r;
5  }
6
7  AF_Value_t afilter_get_estimate(Alpha_Filter *filter) {
8    return filter->x;
9  }
```

Zwei Prinzipien für die Übung

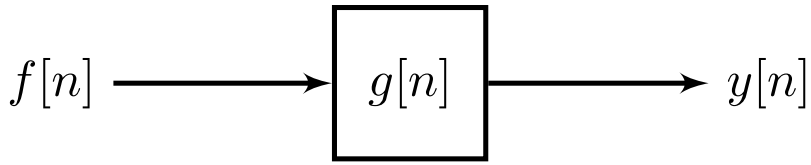
KISS – Keep it Small and Simple!

- Kleine Softwaremodule mit geringer Kopplung
- *Eine* (C-)Funktion löst *eine* Aufgabe

☞ Bessere Wartbarkeit, Testbarkeit, Verifizierbarkeit

Inhalt

Hinweise zur Aufgabe Implementierung Filter

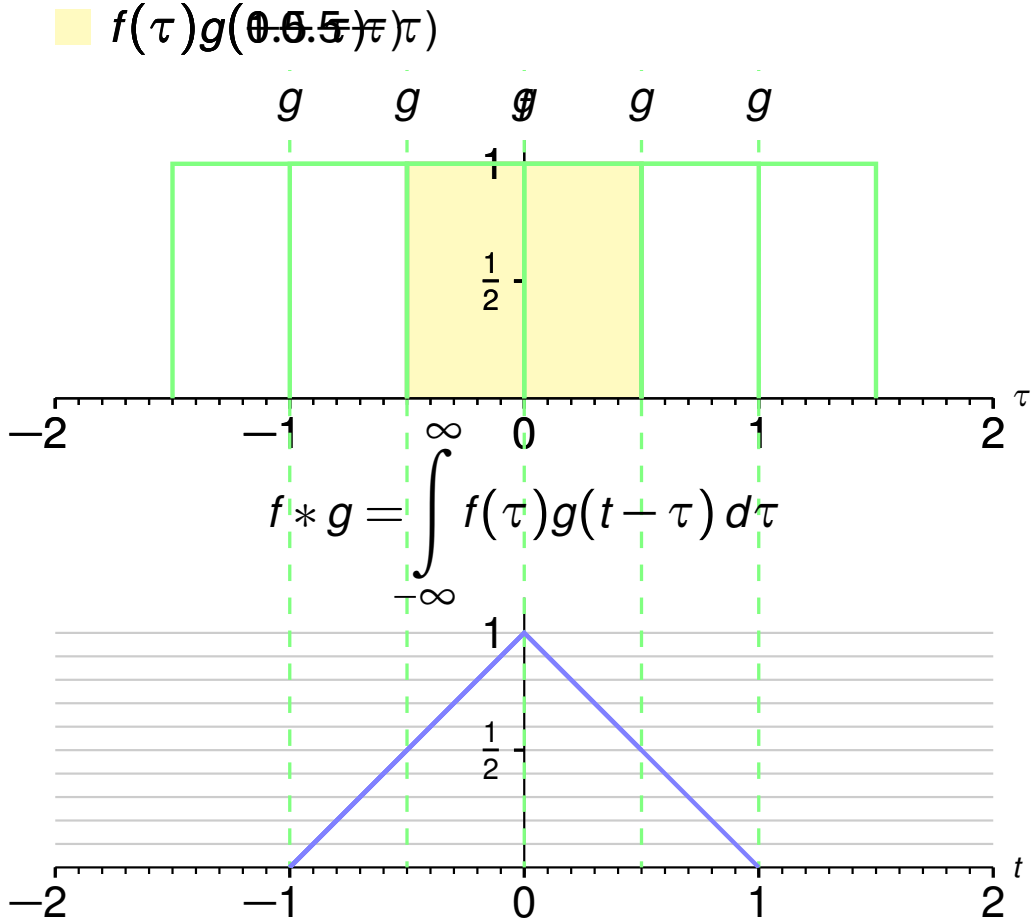


- Objekte identifizieren (z.B. Eingaben)
- Implementierung der Filterung durch **Faltung** (engl. convolution) mit Impulsantwort
  - f Signalwerte, g Filterwerte

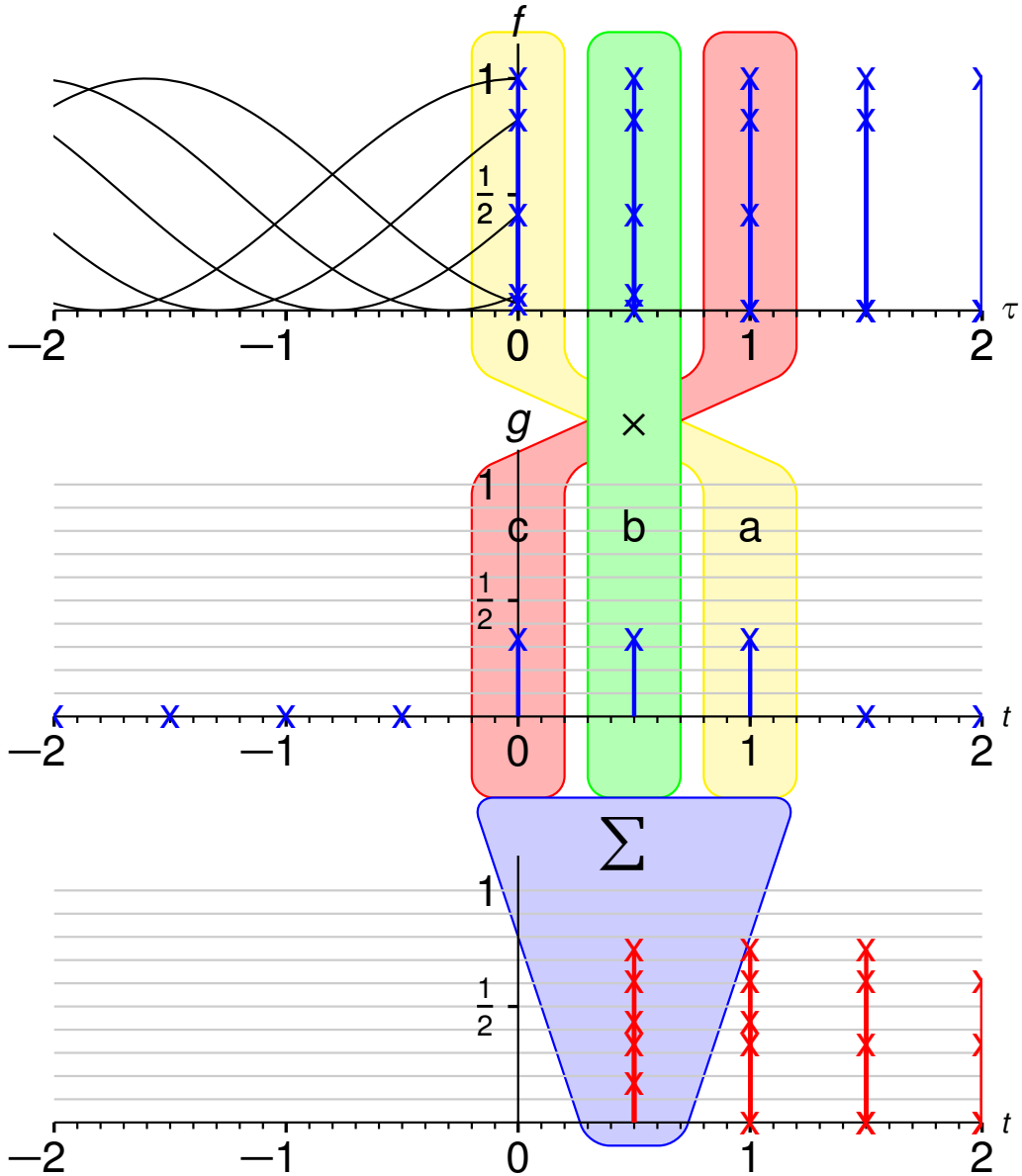
$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m] \cdot g[n-m] \tag{10}$$

- Impulsantwort: Reaktion des Systems auf Dirac-Impuls
- Oft Transformation in Frequenzbereich $\rightsquigarrow$ verringert Rechenbedarf
- Zunächst Verwendung von `float`, anschließend **Festkommaformat**

Beispiel: Faltung



Beispiel: Diskrete Faltung



$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m] \cdot g[n-m]$$

Exkurs: Prüfsummen

- Verkürzte Repräsentation eines Datensatzes (Bsp.: Git Commithash)
- Aus Eingabedaten errechnet
- Nutzen: Überprüfung der Datenintegrität
- Anforderungen
  - Stabil
  - Effizient berechenbar
  - Zuverlässige Fehlererkennung
- Beispiel: Quersumme mit Zehner-Restklasse:

$$\mathrm{CHECK}(12345) = (1+2+3+4+5) \mod 10 = 5$$
$$\mathrm{CHECK}(12355) = (1+2+3+5+5) \mod 10 = 6$$

$\rightsquigarrow$ Fehlermodell: Schützt vor allen Einzifferfehlern
$\rightsquigarrow$ jedoch bspw. kein Schutz gegen Vertauschung:

$$\mathrm{CHECK}(12354) = (1+2+3+5+4) \mod 10 = 5$$

- Wichtig: Fehlermodell, welche Arten von Bitfehlern werden erkannt?

Hinweise zur Aufgabe

- **Einzelnen Filterschritt** implementieren (kein Burst-Filter)
- Verwendung von **Q-Notation**
- *Wichtig für die späteren* `FAIL*` *Fehlerinjektionsexperimente*

1. Berechnungsdauer möglichst kurz (Fehlerinjektion dauert sehr lange)
2. FAIL* hat keine Unterstützung für `float`
3. Später dann: Keine Verwendung von `printf` bei Fehlerinjektion
4. Konzeption einer einfachen Prüfsumme

- Aspekte:
  - Einfluss von Schnittstellen auf Verlässlichkeit
  - Unbestimmtheit in Spezifikationen erkennen
  - Nutzung abstrakter Schnittstellen
  - Entwurfsentscheidungen und -abwägung in der Systemimplementierung

Literatur I

Grady Booch.
Software Engineering with Ada.
The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 2nd edition, 1987.

Erick L. Oberstar.
Fixed-point representation & fractional math.
Technical report, Oberstar Consulting, August 2007.