Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Florian Franzmann, Martin Hoffmann, Isabella Stilkerich

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

15. Mai 2013

Überblick

Astrée [1]

- Ziel: Nachweis der Abwesenheit von Laufzeitfehlern
- findet alle potentiellen Laufzeitfehler
- leider auch *falsch-positive*
  ⇝ wegen Gödelschem Unvollständigkeitstheorem

  Jedes hinreichend mächtige formale System ist entweder widersprüchlich oder unvollständig.

Programm ist korrekt, wenn

- Astrée keine Alarme meldet
- oder für alle Alarme nachgewiesen, dass falsch-positiv

Astrée weist nach

- Überschreitung von Array-Grenzen
- Ganzzahldivision durch Null
- ungültige Dereferenzierung, arithmetische Überläufe
- ungültige Gleitkommaoperationen
- dass Code nicht erreichbar ist
- Lesezugriff auf nicht initialisierte Variabeln
- Verletzung benutzerdefinierter Zusicherungen
  ⇝ `assert()`

Was Astrée nicht kann

Astrée kann nicht umgehen mit

- Rekursionen
- dynamischem Speicher
  ⇝ kein `malloc()`

Aber das will man im Echtzeitbereich ja sowieso nicht haben ☺

Einschränkungen

Astrée nimmt an, dass als Einschränkungen gelten:

1. der C99-Standard
2. implementierungsabhängiges Verhalten
   - Größe von Datentypen
   - Gleitkommastandard
   - ...
3. benutzerdefinierte Einschränkungen
   - z. B. ob statische Variablen mit 0 initialisiert werden
4. außerdem benutzerspezifizierte Zusicherungen

Benutzerdefinierte Zusicherungen

`__ASTREE_known_fact((B))`

- wird nicht weiter überprüft
- Analyzer warnt, falls `B` *nie wahr*

`__ASTREE_assert((B))`

- alterntiv auch `assert()`
- Analyzer erzeugt Alarm, falls `B` *nicht immer wahr*
- `B` kann nicht von der Form `e1 ? e2 : e3` sein

- Analyzer nimmt danach an, dass `B` wahr ist
- *die doppelten Klammern sind wichtig!*

Beispiel

```
1  #if 0
2  #include <astree.h> // Astree-Makros abschalten
3  #endif
4
5  float filter(Alpha_State *s, float val) {
6    __ASTREE_known_fact((val == val));
7    __ASTREE_known_fact((-10.0f < val && val < 10.0f));
8    __ASTREE_known_fact((s->val == s->val));
9    __ASTREE_known_fact((FLT_MIN < s->val
10                        && s->val < FLT_MAX));
11   __ASTREE_assert((0 < s->alpha));
12   __ASTREE_assert((s->alpha < 1));
13
14   float residual = val - s->val;
15   s->val = s->val + s->alpha * residual;
16
17   __ASTREE_assert((s->val == s->val));
18   // ...
19   return s->val;
20 }
```

Variable auf „unbekannter Wert“ setzen

`__ASTREE_modify((V1, ..., Vn))`

- zeigt an, dass Variablen `V1` bis `Vn` unbekannten Wert haben

⇝ braucht man um Stubs zu bauen

volatile

`__ASTREE_volatile_input((V))`

- zeigt an, dass `V` sich jederzeit ändern kann

`__ASTREE_volatile_input((Vp, r))`

- `p` ist Pfad in der Variablen,
  z. B. `V.a[3-4].b` ⇝ Variable `V`, Arrayelemente `a[3]` und `a[4]`, Struct-Element `b`
  - `[i]` ⇝ Element `i`
  - `[i-j]` ⇝ Elemente `i` bis `j`
  - `[]` ⇝ alle Elemente
- `r` schränkt Wertebereich ein `[i, j]` ⇝ von `i` bis `j`

Analyse untersuchen

`__ASTREE_analysis_log(())`

- gibt Zustand der Analyse an dieser Stelle aus

`__ASTREE_log_vars((V1, ..., Vn))`

- zeigt Zustand der Analyse in Bezug auf einzelne Variabeln an

`__ASTREE_print(("text"))`

- gibt Text aus

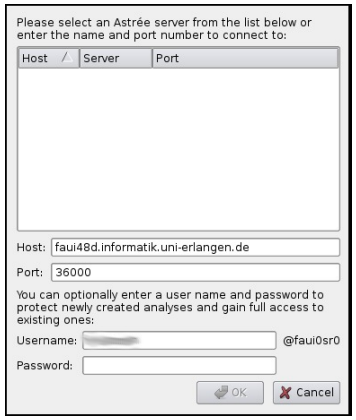
Astrée verwenden

- Astrée im CIP:
  `% /proj/i4ezs/tools/astree_c-13.04/bin/astreec`
- Anmeldung mit Benutzername und Passwort

⇝ Passwort wird bei der ersten Anmeldung festgelegt
- gute merken ☺
- Dokumentation unter
  `/proj/i4ezs/tools/astree_c-13.04/share/astree_c/help`

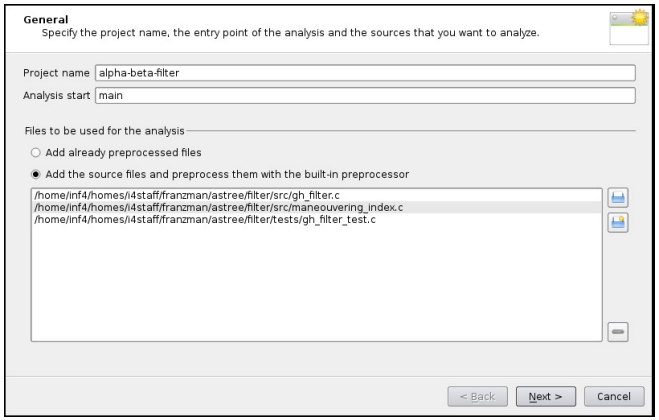
Anmelden

Host	faui48d.informatik.uni-erlangen.de
Port	36000
Username	nach Belieben
Passwort	bei der ersten Anmeldung festlegen und *gut merken*



Projekt anlegen

- Quelldateien zum Projekt hinzufügen



Präprozessoreinstellungen

- Include-Pfade festlegen

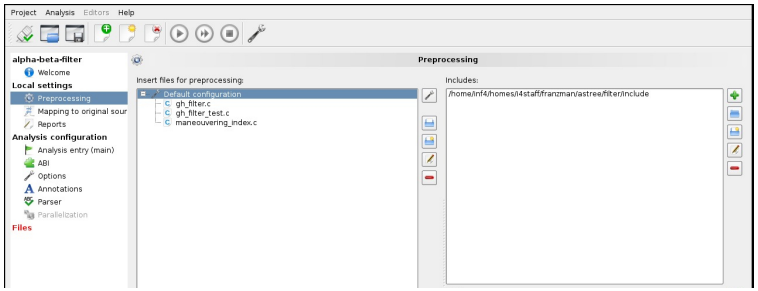


Table of Contents

Aufgabenstellung

- einfaches Filter implementieren
- Korrektheit der Implementierung nachweisen
  ⇝ Astrée
- zunächst mit Gleitkommaarithmetik
  ⇝ `float`
- dann für einen 8 Bit-Mikrocontroller mit Festkommaarithmetik

Festkommaarithmetik – Q-Notation

- kaum ein Mikrocontroller hat eine Gleitkommaeinheit
  ⇝ Festkommaarithmethik mit Ganzzahlen
- Zahlenformat häufig in Q-Notation [8] angegeben
- Q$m.n$ ⇝ Festkommazahl mit
  - m Bit vor dem Komma
  - n nach dem Komma
  - und einem Vorzeichenbit
  - Wertebereich: $[-2^m, 2^m - 2^{-n}]$
  - Auflösung: 2^{-n}

Implementierung als Integer

⇝ welches Q-Format Verwendung findet, ist dem Anwendungsprogrammierer überlassen

Q-Notation – Beziehung zu Gleitkommazahlen

von Gleitkomma nach Qm.n

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

von Qm.n nach Gleitkomma

1. Umwandlung in Gleitkommazahl ⇝ cast
2. Multiplikation mit 2^{-n}

Operationen – Addition/Subtraktion

- Addition und Subtraktion wie bei Ganzzahlen

Addition

```
1 int8_t       a = ...;
2 int8_t       b = ...;
3 int8_t result = a + b;
```

Subtraktion

```
1 int8_t       a = ...;
2 int8_t       b = ...;
3 int8_t result = a - b;
```

Operationen – Multiplikation/Division

- braucht Zwischenergebnis von doppelter Bitbreite

Multiplikation

```
1 #define K    (1 << (n - 1))
2 int8_t     a = ...;
3 int8_t     b = ...;
4 int16_t temp = (int16_t) a * (int16_t) b;
5        temp += K;
6 int8_t result= temp >> n;
```

Division

```
1 int8_t      a = ...;
2 int8_t      b = ...;
3 int16_t  temp = (int16_t) a << n;
4         temp += b / 2;
5 int8_t result = temp / b;
```


Größe von Datentypen bestimmen I

- `% cat test.c`

```
1  #include <stddef.h>
2
3  static size_t short_size      = sizeof(short);
4  static size_t ushort_size     = sizeof(unsigned short);
5  static size_t int_size        = sizeof(int);
6  static size_t uint_size       = sizeof(unsigned int);
7  static size_t long_size       = sizeof(long);
8  static size_t ulong_size      = sizeof(unsigned long);
9  static size_t longlong_size   = sizeof(long long);
10 static size_t float_size      = sizeof(float);
11 static size_t double_size     = sizeof(double);
12 static size_t longdouble_size = sizeof(long double);
13 static size_t ptr_size        = sizeof(void *);
14 static size_t fptr_size       = sizeof(void (*)(void));
15 void main(void) {}
```

- `% avr-gcc -O0 -S -c test.c`

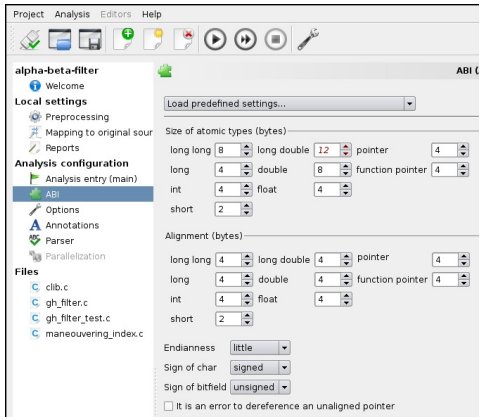
Größe von Datentypen bestimmen II

`% cat test.s`

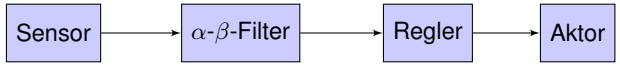
```
...
1 short_size:
2   .word 2 ← short zwei Byte lang
3 .subsection   2
4   .align 2
5   .type   ushort_size,@object
6   .size   ushort_size,4
...
```


ABI

- ABI festlegen



α-β-Filter [4]

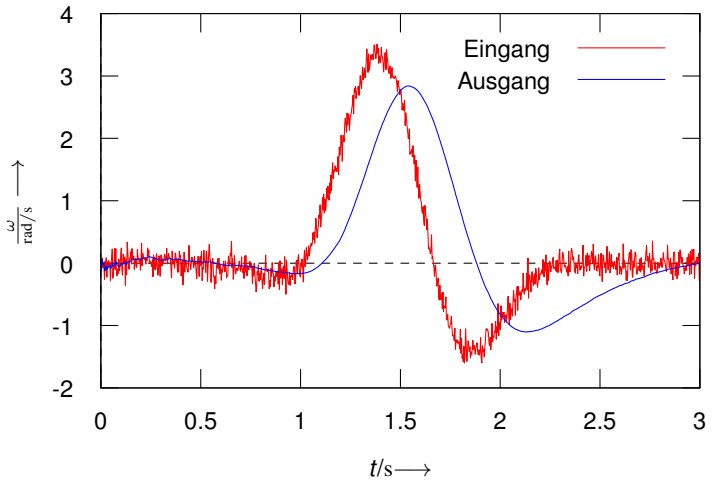


- Rauschunterdrückungsfilter
- geeignet zur Schätzung von physikalischen Größen
  - mit Ableitung $\neq 0$
  - z. B. Position eines Flugzeugs, Lagewinkel ...
  - im I4Copter
    - liefern Sensoren häufiger Werte als diese später verarbeitet werden

    $\rightsquigarrow$ α-β-Filter für *Ratenwandlung* verwendet

    $\rightsquigarrow$ nutzt gewonnene Information vollständig

Beispiel α-β-Filterung



Filteralgorithmus

- wird für jeden Messwert ausgeführt
- $y[\kappa]$: Eingabewert für Abtastschritt κ
- $\hat{x}[\kappa]$: Schätzung der Messgröße zum Abtastschritt κ
- T Abtastintervall, α, β Filterparameter
- Initialisierung: z. B. $\hat{x}[0] = \hat{\dot{x}}[0] = 0$

$$r[\kappa] = y[\kappa] - \hat{x}[\kappa - 1] \qquad \rightsquigarrow \text{Schätzfehler} \qquad (1)$$

$$\hat{\dot{x}}[\kappa] = \hat{\dot{x}}[\kappa - 1] + \frac{\beta}{T} \cdot r[\kappa] \qquad \rightsquigarrow \text{1. Ableitung} \qquad (2)$$

$$\hat{x}[\kappa] = \hat{x}[\kappa - 1] + T \cdot \hat{\dot{x}}[\kappa] + \alpha \cdot r[\kappa] \qquad \rightsquigarrow \text{Schätzwert} \qquad (3)$$

- sinnvolle Werte für α und β?
  - Literatur beschreibt viele Verfahren $\rightsquigarrow$ hier beispielhaft nur eines [6, 5]

Filterparameter

T Abtastintervall
$\rightsquigarrow$ in welchem Zeitabstand gemessen wird

σ_w^2 Prozessvarianz
$\rightsquigarrow$ wie lebhaft der gemessene Prozess ist

σ_v^2 Rauschvarianz
$\rightsquigarrow$ wie verrauscht das Signal ist

$$\lambda = \frac{\sigma_w T^2}{\sigma_v} \qquad \rightsquigarrow \text{Tracking Index} \qquad (4)$$

$$\theta = \frac{4 + \lambda - \sqrt{8\lambda + \lambda^2}}{4} \qquad \rightsquigarrow \text{Dämpfungsparameter} \qquad (5)$$

$$\alpha = 1 - \theta^2 \qquad \rightsquigarrow \text{Gewicht für Wert} \qquad (6)$$

$$\beta = 2(2 - \alpha) - 4\sqrt{1 - \alpha} \qquad \rightsquigarrow \text{Gewicht für Ableitung} \qquad (7)$$

Sinnvolle Wertebereiche

- Erfahrungen mit dem I4Copter haben gezeigt, dass sich die Parameter in folgenden Bereichen bewegen:

  Abtastintervall $T \in (0 \ldots 1]$
  Prozessvarianz $\sigma_w^2 \in [0.5 \ldots 2.0]$
  Rauschvarianz $\sigma_v^2 \in \left[10^{-3} \ldots 10^{-1}\right]$
  Wert $y\,[\kappa] \in [-10 \ldots 10]$

$\rightsquigarrow$ Korrektheit mindestens für diese Wertebereiche zeigen!

Korrektheitsbedingung

- Filter ist nur dann korrekt, wenn es auch *stabil* ist
  - $\rightsquigarrow$ für wertbegrenzte Eingabe erfolgt wertbegrenzte Ausgabe [7]
  - $\rightsquigarrow$ für Eingabe 0 geht der Filterausgang asymptotisch gegen 0
- α-β-Filter stabil, wenn gilt

$$0 < \alpha \leq 1 \tag{8}$$
$$0 < \beta \leq 2 \tag{9}$$
$$0 < 4 - 2\alpha - \beta \tag{10}$$

- Außerdem: laut [2] Rauschunterdrückung nur dann, wenn

$$0 < \beta < 1 \tag{11}$$

- andernfalls wird das Rauschen verstärkt!

Literatur I

[1] AbsInt Angewandte Informatik GmbH.
The Static Analyzer Astrée, April 2012.

[2] C. Frank Asquith.
Weight selection in first-order linear filters.
Technical report, Army Intertial Guidance and Control Laboratory Center, Redstone Arsenal, Alabama, 1969.

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

[4] Eli Brookner.
Tracking and Kalman Filtering Made Easy.
Wiley-Interscience, 1st edition, 4 1998.

[5] E. Gray, J. and W. Murray.
A derivation of an analytic expression for the tracking index for the alpha-beta-gamma filter.
IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 29:1064–1065, 1993.

Literatur II

[6] Paul R. Kalata.
The tracking index: A generalized parameter for α-β and α-β-γ target trackers.
IEEE *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20(2):174–181, mar 1984.

[7] Richard G. Lyons.
Understanding Digital Signal Processing.
Prentice Hall, 3rd edition, 11 2010.

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

Table of Contents

Ziele des Softwareentwurfs

Modifizierbarkeit: lokale Veränderbarkeit

- ⇝ Änderungen an Anforderungen umsetzbar
- ⇝ Fehler korrigierbar

Effizienz: optimaler Betriebsmittelbedarf

- wird häufig zu früh berücksichtigt

Verlässlichkeit: über lange Zeit Funktionsfähigkeit 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

⇝ disziplinierte Herangehensweise notwendig!

Fragestellung

Wie komme ich von der Beschreibung zur Software?

Objektorientierter/Objektbasierter Entwurf [3]

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

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

$$r[\kappa] = y[\kappa] - \hat{x}[\kappa - 1] \quad (12)$$
$$\hat{x}[\kappa] = \hat{x}[\kappa - 1] + \alpha \cdot r[\kappa] \quad (13)$$

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

$$\lambda = \sigma_w \cdot T^2 / \sigma_v \quad (14)$$
$$\alpha = \left(-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + 16\lambda^2}\right)/8 \quad (15)$$

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
- Was soll bei unserem Filter öffentlich sein?
  - Initialisierung
  - Filterschritt
  - Schätzung abfragen
- alle anderen Operationen modulintern

  $\leadsto$ 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

$$\hat{x}[0] = 0 \tag{16}$$

$$\lambda = \sigma_w \cdot T^2/\sigma_v \tag{17}$$

$$\alpha = \left(-\lambda^2 + \sqrt{\lambda^4 + 16\lambda^2}\right)/8 \tag{18}$$

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; }
```

5. Implementierung – Filterschritt

$$r[\kappa] = y[\kappa] - \hat{x}[\kappa - 1] \tag{19}$$

$$\hat{x}[\kappa] = \hat{x}[\kappa - 1] + \alpha \cdot r[\kappa] \tag{20}$$

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  {
9    return filter->x;
10 }
```

Fragen?