Tema 13. Fiabilidad y tolerancia de fallos

1. Introducción y objetivos
2. Prevención y tolerancia de fallos
3. Redundancia estática y dinámica
   a. Programación con N versiones
   b. Bloques de recuperación
   c. Excepciones
4. Seguridad, fiabilidad y confiabilidad

Introducción y objetivos

Objetivos

- El aspecto que queremos tratar es el de la extremada fiabilidad exigida a los sistemas de tiempo real
- Veremos cuáles son los factores que afectan a la fiabilidad de un sistema
- También veremos algunas técnicas para tolerar fallos en el software

- Los fallos de funcionamiento de un sistema pueden tener su origen en:
  - Una especificación inadecuada
  - Diseño defectuoso del software y/o el hardware
  - Averías en el hardware
  - Interferencias en las comunicaciones
    - transitorias o permanentes
- Nos centraremos en el estudio de los errores en el software

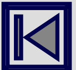
- La fiabilidad (*reliability*) de un sistema es una medida de su conformidad con una especificación autorizada de su comportamiento
- Una avería (*failure*) es una desviación del comportamiento de un sistema respecto a su especificación
- Las averías se manifiestan en el comportamiento externo del sistema, pero son el resultado de errores (*errors*) internos
- Las causas mecánicas o algorítmicas de los errores se llaman fallos (*faults*)
- Los fallos pueden ser consecuencia de averías en los componentes del sistema

- Fallos **transitorios**:
  - desaparecen por sí solos al cabo de un tiempo
  - ejemplo: interferencias en las comunicaciones
- Fallos **permanentes**:
  - duran hasta que se reparan
  - ej.: un cable roto, un defecto en el software
- Fallos **intermitentes**:
  - fallos transitorios que, además, ocurren de vez en cuando
  - ejemplo: calentamiento de un componente del hardware

Modos de fallo

nunca falla

- fallo
  - valor
    - intervalo
    - tipo
  - tiempo
    - pronto
    - nunca
      - fallo silencioso
      - fallo de parada
    - tarde
  - arbitrario
    - fallo incontrolado



Prevención y tolerancia de fallos

Prevención y tolerancia de fallos

- Hay dos formas de aumentar la fiabilidad de un sistema:
  - Prevención de fallos
    - se trata de evitar, antes de que el sistema entre en funcionamiento, que se introduzcan fallos
  - Tolerancia de fallos
    - se trata de conseguir que el sistema continúe funcionando aunque se produzcan fallos
- En ambos casos el objetivo es desarrollar sistemas con modos de fallo bien definidos
- No son incompatibles

- Se realiza en dos etapas:
  - Evitación de fallos
    - se trata de impedir que se introduzcan fallos durante la construcción del sistema
  - Eliminación de fallos
    - consiste en encontrar y corregir los fallos que se producen en el sistema una vez construido

Técnicas de evitación de fallos

- Hardware:
  - Utilización de componentes fiables
  - Técnicas rigurosas de montaje de subsistemas
  - *Apantallamiento* del hardware
- Software:
  - Especificación rigurosa (formal) de requisitos
  - Métodos de diseño comprobados
  - Lenguajes con abstracción de datos y modularidad
  - Utilización de entornos de desarrollo con computador (*CASE*) adecuados para gestionar los componentes

Técnicas de eliminación de fallos

- Comprobaciones:
  - Revisiones del diseño
  - Verificación de los programas
  - Inspección del código
- Pruebas (*tests*):
  - Son necesarias, pero insuficientes:
    - nunca llegan a ser exhaustivas
    - sólo sirven para mostrar que hay errores, pero no que no los hay
    - muchas veces es imposible reproducir las condiciones reales
    - los errores de especificación no se detectan

Limitaciones de la prevención de fallos

- Los componentes del hardware fallan, a pesar de las técnicas de prevención
- La prevención es insuficiente si:
  - la frecuencia o la duración de las reparaciones es inaceptable
  - no se puede detener el sistema para efectuar operaciones de mantenimiento
- La alternativa es utilizar las técnicas de tolerancia de fallos

- Formas:
  - Tolerancia completa (*fail operational*)
    - El sistema sigue funcionando, al menos durante un tiempo, sin perder funcionalidad ni prestaciones
  - Degradación elegante (*fail soft*)
    - El sistema sigue funcionando con una pérdida parcial de funcionalidad o prestaciones hasta la reparación del fallo
  - Parada segura (*fail safe*)
    - El sistema se detiene en un estado que asegura la integridad del entorno hasta que se repare el fallo
- El grado y la forma de tolerancia de fallos dependen de la aplicación

Redundancia estática y dinámica

- La tolerancia de fallos se basa en la redundancia
- Se utilizan componentes adicionales para:
  - detectar los fallos y
  - recuperar el funcionamiento correcto
- Esto aumenta la complejidad del sistema
  - y puede introducir fallos adicionales
- Es mejor separar del resto del sistema a los componentes tolerantes de fallos

- Redundancia estática
  - los componentes redundantes están siempre activos
  - se utilizan para enmascarar los fallos
  - Ejemplo:
    - Redundancia Modular N (triple o más)
- Redundancia dinámica
  - los componentes redundantes se activan cuando se detecta un fallo
  - se basa en la detección y posterior recuperación de los fallos
  - Ejemplo:
    - bits de paridad de las memorias

- Técnicas para detectar y corregir errores de diseño
  - Redundancia estática
    - Programación con N versiones
  - Redundancia dinámica
    - Dos etapas: detección y recuperación de fallos
    - Bloques de recuperación
      - proporcionan recuperación *hacia atrás*
    - Excepciones
      - proporcionan recuperación *hacia adelante*

Programación con N versiones

Programación con N versiones

Comparación consistente

X_1 X_2 X_3

$>x_o$ $>x_o$ no $>x_o$

sí sí

$>y_o$ no $>y_o$ $>y_o$

sí

V_1 V_2 V_3

- La comparación de valores reales no es exacta
- Cada versión produce un resultado correcto, pero diferente de las otras
- No se arregla permitiendo una tolerancia $\pm\Delta$

Problemas de la programación con N versiones

- La correcta aplicación de este método depende de:
  - Especificación inicial
    - si hay un error en la especificación, aparecerá en todas las versiones
  - Desarrollo independiente
    - no debe haber interacción entre los equipos
    - no es seguro que distintos programadores cometan errores independientes
  - Presupuesto suficiente
    - los costes de desarrollo se multiplican
    - el mantenimiento es también más costoso
- Se ha utilizado en sistemas de aviónica críticos

Redundancia dinámica en software

Redundancia dinámica en software

- Los componentes redundantes sólo se ejecutan cuando se detecta un error
- Se distinguen cuatro etapas:
  1. Detección de errores
  2. Evaluación y confinamiento de los daños
  3. Recuperación de errores
     - se trata de llevar el sistema a un estado correcto, desde el que pueda seguir funcionando
  4. Reparación de fallos
     - aunque el sistema funcione, el fallo puede persistir y hay que repararlo

- Por parte del entorno de ejecución
  - hardware (p.ej. Instrucción ilegal)
  - núcleo o sistema operativo (p.ej. puntero nulo)
- Por parte del software de aplicación
  - duplicación (redundancia con 2 versiones)
  - comprobaciones de tiempo (vigilante)
  - funciones inversas
  - códigos detectores de error (sumas)
  - validación de estado *razonable*: estática (rango) o dinámica (salidas consecutivas)
  - validación estructural (integridad de listas)

Evaluación y confinamiento de daños

- El objetivo es confinar los daños causados por un fallo a una parte acotada del sistema
- Se trata de estructurar el sistema de forma que se minimice el daño causado por los componentes defectuosos
  - compartimentos estancos, cortafuegos
- Técnicas
  - Descomposición modular: confinamiento estático
  - Acciones atómicas: confinamiento dinámico

- Es la etapa más importante
- Se trata de situar al sistema en un estado correcto desde el que pueda seguir funcionando
- Hay dos maneras de proceder:
  - recuperación hacia adelante
    - se avanza desde un estado erróneo haciendo correcciones sobre partes del estado
  - recuperación hacia atrás
    - se retrocede a un estado anterior correcto que se ha guardado previamente

Recuperación de errores hacia adelante

- Continuar tras correcciones selectivas
  - la forma de hacerla es específica de cada sistema
- Depende de una predicción correcta de:
  - los posibles fallos y
  - su situación
- También hay que dejar en un estado seguro al sistema controlado
- Ejemplos:
  - punteros redundantes en estructuras de datos
  - códigos autocorrectores (Hamming)

Recuperación de errores hacia atrás

- Consiste en:
  - retroceder a un estado anterior correcto y
  - ejecutar un segmento de programa alternativo (con otro algoritmo)
- el estado al que se retrocede se llama punto de recuperación
- no es necesario averiguar la causa ni la situación del fallo
- sirve para fallos imprevistos
- no puede deshacer los errores que aparecen en el sistema controlado

- Con procesos concurrentes que interaccionan, la recuperación se complica

- Solución: líneas de recuperación (conjuntos consistentes de puntos)

- La reparación automática es difícil y depende del sistema concreto
- Hay dos etapas:
  - Localización del fallo
    - mediante técnicas de detección de errores
  - Reparación del sistema
    - Los componentes del hardware se pueden cambiar
    - Los componentes del software se *reparan* haciendo una nueva versión
    - En los sistemas sin parada es necesario reemplazar el componente defectuoso sin detener el sistema

Bloques de recuperación

Bloques de recuperación

- Es una técnica de recuperación hacia atrás integrada en el lenguaje de programación
- En un bloque de recuperación:
  - su entrada es un punto de recuperación
  - a su salida se efectúa una prueba de aceptación
    - comprueba si el módulo primario del bloque termina en un estado correcto
  - si la prueba de aceptación falla
    - se restaura el estado inicial en el punto de recuperación
    - se ejecuta un módulo alternativo del mismo bloque
  - si vuelve a fallar, se siguen intentando alternativas
  - cuando ya no quedan más, el bloque falla y hay que intentar la recuperación en un nivel más alto

Funcionamiento de los bloques de recuperación

Entrada al bloque de recuperación

establecer punto de recuperación

¿quedan alternativas?

no

Fallo del bloque de recuperación

sí

restaurar punto de recuperación

ejecutar alternativa

prueba de aceptación

mal

bien

descartar punto de recuperación

Salida del bloque de recuperación

Codificación en Ada

```
ensure <condición de aceptación>
by
  <módulo primario>
else by
  <módulo alternativo>
else by
  <módulo alternativo>
...
else by
  <módulo alternativo>
else error;
```

- Puede haber bloques anidados
  - si falla el bloque interior, se restaura el punto de recuperación del bloque exterior

Ejemplo de codificación en Ada: ecuación diferencial

- Hay un método explícito, que es más rápido, pero cuyo margen de error no es aceptable para algunos tipos de ecuaciones
- El método implícito sirve para todas las ecuaciones, pero es más lento

```
ensure precision <= tolerancia
by
  Explicit_Runge_Kutta;
else by
  Implicit_Runge_Kutta;
else error;
```

- Este esquema sirve para todos los casos
- Puede tolerar fallos de programación

- Es fundamental para el buen funcionamiento de los bloques de recuperación
- Hay que buscar un compromiso entre detección exhaustiva de fallos y eficiencia de ejecución
- Se trata de asegurar que el resultado es aceptable, no necesariamente correcto
- Pero hay que tener cuidado de que no queden errores residuales sin detectar

N versiones

- Redundancia estática
- Diseño
  - algoritmos alternativos
  - proceso guía
- Ejecución
  - múltiples recursos
- Detección de errores
  - votación

Bloques de recuperación

- Redundancia dinámica
- Diseño
  - algoritmos alternativos
  - prueba de aceptación
- Ejecución
  - puntos de recuperación
- Detección de errores
  - prueba de aceptación

Excepciones

Excepciones

- Una excepción es una manifestación de una situación de error
- Cuando se produce un error, se lanza la excepción correspondiente en el contexto donde se ha invocado la actividad errónea
- Esto permite tratar la excepción en dicho contexto
- Se trata de un mecanismo de recuperación hacia adelante de errores
- Pero también se puede utilizar para realizar recuperación hacia atrás

Aplicaciones de las excepciones

- Hacer frente a situaciones anormales que surjan en el sistema controlado
- Tolerar fallos de diseño del software
- Proporcionar un mecanismo de propósito general para la detección y la corrección de errores

Composición ideal de un sistema tolerante de los fallos

Seguridad, fiabilidad y confiabilidad

Seguridad y fiabilidad

- Un sistema es seguro si está a salvo de situaciones que puedan causar muertes, heridas, enfermedades (a las personas), o daños en (o pérdida de) los equipos o en el ambiente
  - un accidente (*mishap*) es un suceso imprevisto que puede producir daños inadmisibles
- Fiabilidad: medida de hasta qué punto un sistema cumple sus especificaciones
  - Un sistema puede ser seguro y no ser fiable
  - y puede ser fiable y no ser seguro
- La seguridad es la probabilidad de que no se produzcan situaciones que puedan conducir a accidentes, independientemente de que se cumpla la especificación o no

Confiabilidad. 1

- La confiabilidad (*dependability*) es una propiedad de los sistemas que permite confiar justificadamente en el servicio que proporcionan
- Tiene varios atributos:
  - disponibilidad: capacidad de utilización
  - fiabilidad: continuidad en la prestación del servicio
  - seguridad: no ocurrencia de situaciones catastróficas
  - confidencialidad: no ocurrencia de fugas de información no autorizadas
  - integridad: no ocurrencia de alteraciones no permitidas de la información
  - mantenibilidad: aptitud para soportar reparaciones y evoluciones

- Los medios para conseguirla son:
  - Prevención de fallos
  - Eliminación de fallos
  - Tolerancia de fallos
  - Predicción de fallos
- Los obstáculos que pueden impedirla:
  - Defectos
  - Errores
  - Fallos