

# النظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## Real Time Embedded Systems

جامعة  
المنارة  
HARAMA UNIVERSITY

Dr.-Eng. Samer Sulaiman

2020-2021

# مفردات المنهاج

- أساسيات النظم المضمنة في الزمن الحقيقي
- عناصر وتقنيات النظم المضمنة في الزمن الحقيقي
- تصميم النظم المضمنة في الزمن الحقيقي



# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • النظم المقادة بالمقاطعة Interrupt-driven systems:

#### • أهم الطرق المستخدمة:

#### • روتينات تخدم المقاطعات (ISR) Interrupt Service Routines:

#### • يوجد نوعان للمقاطعة في أي نظام:

#### • مقاطعات مادية:

• وهي إشارات تولدها التجهيزات المحيطة peripherals وترسل إلى المعالج الذي يستجيب لها بتنفيذ روتين تخدم المقاطعة والذي يقوم بما يلزم لتلبية هذه المقاطعة.

• هذه المقاطعات هي الوسيلة التي تمكن التجهيزات المحيطة من إخبار المعالج بحاجتها لأن يلتفت إليها لسبب ما (حدوث خطأ، إنتهاء عملية دخل/خرج، ...).

#### • مقاطعات برمجية:

• تشبه المقاطعات المادية، لكن مصدر المقاطعة هو تعليمات خاصة تُستدعى برمجياً

• عادة ما يُستعمل هذا النوع من المقاطعات لاستدعاء الخدمات التي يقدمها نظام التشغيل (التي تكون على شكل روتينات تخدم هذه المقاطعات البرمجية).

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

- المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:
  - نظم تشغيل الزمن الحقيقي:
    - نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:
      - النظم المقادة بالمقاطعة Interrupt-driven systems:
      - أهم الطرق المستخدمة:
        - روتينات تقديم المقاطعات (ISR) Interrupt Service Routines:
        - يوجد في لغات البرمجة الحديثة مفهوما هاما هو "الاستثناءات" exceptions
          - تعتبر بمثابة مقاطعات برمجية داخلية (أي يولدها المعالج داخليا) عندما يحاول البرنامج تنفيذ عمليات غير قانونية وغير متوقعة (مثل التقسيم على صفر أو محاولة فتح ملف غير موجود).
          - يقفز المعالج عند حدوث الاستثناء إلى روتين تقديم المقاطعة وينفذ التعليمات الموافقة له.
          - توصف المقاطعات المادية بأنها ذات طبيعة غير متزامنة، أي أنها يمكن أن تحدث في أية لحظة.
          - عندما تحدث، يتوقف تنفيذ البرنامج الذي كان المعالج ينفذه وينتقل التنفيذ (فوراً أو بعد حين) إلى روتين تقديم المقاطعة .ISR
          - يحتاج مطور النظام عادةً لكتابة ISR لبعض المقاطعات المادية، ومن المهم عندها أن يفهم جيداً ممّ تتألف حالة المعالج وما هي السجلات التي يجب على ISR أن يحفظها.
          - في حال شارك أي برنامج مع روتين تقديم مقاطعة ما ببعض المصادر المشتركة،
            - الطريقة الوحيدة لتنسيق عملية الوصول إليها هي حجب المقاطعة قبل الوصول إليها في البرنامج وتأهيلها من جديد بعد الانتهاء منها.
            - السبب هو أنه لا يمكن استعمال طرق التزامن (أو المنع المتبادل mutual exclusion) الأخرى داخل روتين تقديم المقاطعة لأن ذلك يمكن أن يسبب تجميده لفترة طويلة وغير محدودة بانتظار تحرير المصدر، وهذا أمر غير مرغوب فيه لأنه يمكن أن يؤخر تلبية مقاطعات هامة لفترة غير محدودة.
            - عندما تكون المقاطعات محجوبة، تصبح استجابة النظام للأحداث الخارجية ضعيفة جداً.
            - لذلك يجب أن يكون الجزء من البرنامج الذي يحجب المقاطعات أقصر ما يمكن.

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

- المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:
  - نظم تشغيل الزمن الحقيقي:
    - نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:
    - النظم المقادة بالمقاطعة Interrupt-driven systems:
    - أهم الطرق المستخدمة:
      - روتينات تخديم المقاطعات (ISR) Interrupt Service Routines:
      - يمكن أن يكون "قابل لإعادة الدخول" reentrant إذا سمح بتلبية أي مقاطعة قبل أن ينتهي تنفيذه
      - حتى ولو كانت المقاطعة الجديدة هي نفسها التي يقوم بتليبيتها حالياً لكن حدثت لسبب آخر.
      - مهما كان نوع المقاطعة (مادية أو برمجية)، يجب على ISR تخزين حالة النظام (وهو ما يسمى بالسياق context) قبل أن يقوم بعمله حتى يكون بالإمكان متابعة تنفيذ الإجراء المقاطع بعد الانتهاء من تلبية المقاطعة.
      - تبديل السياق context switch:
      - يعرف بأنه عملية حفظ معلومات كافية (سياق) عن إجراء زمن حقيقي نتيجة مقاطعته، بحيث يمكن متابعة تنفيذه لاحقاً بعد الانتهاء من تنفيذ روتين تخديم المقاطعة.
      - يُستعمل أيضاً عندما ينقل الموزع التنفيذ من إجراء لآخر: تحفظ معلومات الأول وتُسترجع معلومات الثاني ليتابع التنفيذ بدلاً من الأول.
      - تُحفظ معلومات السياق عادة ضمن مكدس النظام system stack
      - يؤثر الزمن اللازم لتبديل السياق تأثيراً كبيراً على زمن استجابة النظام.
      - لذلك، يجب أن يكون أمثلياً وأصغر ما يمكن.
      - تتضمن معلومات السياق الأمور التالية:
        - محتويات السجلات العامة للمعالج لحظة المقاطعة
        - قيمة سجل عداد البرنامج . program counter
        - قيم سجلات المعالج الحسابي المساعد math coprocessor (في حال وجوده).
        - سجل صفحة الذاكرة.
        - مواقع الذاكرة التي تعنون تجهيزات دخل/خرج memory-mapped I/O

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

- المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:
  - نظم تشغيل الزمن الحقيقي:
    - نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:
    - النظم المقادة بالمقاطعة Interrupt-driven systems:
    - أهم الطرق المستخدمة:
    - تبديل السياق context switch:
    - يقوم روتين تقديم المقاطعة بتحجيب المقاطعات أثناء قيامه بتبديل السياق لأنها تُعتبر عملية حرجة يجب أن تتم دون مقاطعة، ثم يفعلها من جديد بعد الانتهاء من التبديل.
    - يُستعمل في النظم المضمنة، لأن عدد إجراءات الزمن الحقيقي أو الإجراءات المقادة بالأحداث محدد في هذه النظم.
    - عندما تحدث المقاطعة، يستدعي المعالج روتين تقديم المقاطعة المناسب الذي يقوم بحفظ سياق الإجراء قيد التنفيذ على المكس أو في منطقة محددة وساكنة في الذاكرة إذا كان النظام وحيد المقاطعة
  - نظم الأولوية الشفعية preemptive-priority:
    - نقول عن إجراء ذو أولوية أعلى أنه يقوم بشُفع (سرقة) المعالج من الإجراء قيد التنفيذ والذي أولويته أقل إذا قاطعه وجعل المعالج ينفذ تعليماته.
    - تُسمى النظم التي تستعمل هذه الطريقة بدلاً من الأساليب الأخرى (الشريط الدوار round-robin أو القادم أولاً يُخدم أولاً first come first serviced) بنظم الأولوية الشفعية.
    - تعتمد أولويات المقاطعات على أهمية وإلحاح المهمات المناطة بها.
    - مثال، الطريقة الأمثل لتحقيق نظام مراقبة محطة توليد كهرباء نووية هي طريقة الأولوية الشفعية.
    - صحيح أن التعامل مع دخيل على المحطة هو أمر مهم، لكن لا شيء أهم من التعامل مع إنذار ارتفاع درجة حرارة نواة المفاعل، وله بالتالي الأولوية الأكبر
    - يمكن أن تكون أولويات المقاطعات ساكنة أو ديناميكية (قابلة للتغيير).
    - النظم ذات المقاطعات الساكنة أقل مرونة لأنه لا يمكن تغيير أولويات المقاطعات أثناء عمل النظام بما يتناسب مع تغير احتياجاته، بينما يمكن عمل ذلك في النظم ذات المقاطعات الديناميكية.
    - تعاني نظم الأولوية الشفعية من مشكلة استئثار الإجراءات ذات الأولوية الأعلى بالمصادر المتاحة في النظام، مما يؤدي لحرمان الإجراءات ذات الأولوية الأدنى منها.
    - نقول في هذه الحالة أن الإجراءات ذات الأولوية الأقل تعاني من مشكلة "المجاعة" starvation

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نظم الأولوية الشفعية preemptive-priority:

• هناك نوع خاص من نظم الأولوية الشفعية المقادة بالمقاطعات تسمى النظم "رتيبة المعدل" Rate Monotonic.

• وهي تضم نظم الزمن الحقيقي ذات الإجراءات الدورية التي يُعطى فيها الأولوية الأعلى للإجراء الدوري الذي له أعلى معدل تنفيذ (أي يُنفذ عدداً أكبر من المرات في الثانية).

• هذه الطريقة شائعة في النظم المضمنة وخصوصاً نظم الطيران

• مثال: نظام الملاحة في الطائرة.

• الإجراء الذي يحصل المعطيات من جهاز قياس التسارع كل 10 ميلي ثانية له أعلى أولوية.

• يأتي في الدرجة الثانية الإجراء الذي يحصل معطيات التوازن كل 40 ميلي ثانية.

• أما الإجراء الذي يُظهر المعطيات على شاشة الطيار كل ثانية فله الأولوية الأدنى

#### • النظم الهجينة hybrid systems:

• تحتوي هذه النظم على مقاطعات تحدث دورياً تعبر عن الإجراءات الدورية periodic بالإضافة إلى مقاطعات غير دورية تعبر عن الإجراءات الغير دورية aperiodic أو المتباعدة sporadic

• يمكن استعمال المقاطعات الغير دورية لمعالجة الأخطاء الحرجة التي تحدث استثنائياً أو يجب معالجتها فوراً،

• وبالتالي يكون لها الأولوية الأعلى.

• تستخدم في النظم المضمنة

• هناك نوع آخر من النظم الهجينة موجود في نظم التشغيل التجارية وهو مزيج من النظم الشفعية مع طريقة الشريط الدوار round-robin

• في هذه النظم، يمكن دائماً للإجراءات ذات الأولوية الأعلى أن تقوم بشُفع preempt الإجراءات ذات الأولوية الأدنى.

• لكن إذا وجد الجدول عدة إجراءات لها نفس الأولوية وجاهزة للتنفيذ، يقوم بجدولتها بطريقة الشريط الدوار

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نموذج كتلة تحكم الإجراء (TCB):

- هذا النموذج هو الأكثر استعمالاً في نظم تشغيل الزمن الحقيقي التجارية الكاملة المواصفات لأنه يسمح بأن يكون عدد الإجراءات متغيراً.
- يُستعمل أيضاً في النظم التفاعلية المتصلة on-line حيث يزيد عدد الزبائن المتصلين بالنظام وينقص باستمرار،
- يُخصَّص لكل زبون متصل إجراء مستقل.
- يمكن استعمال عدة خوارزميات جدولة مع هذا النموذج، مثل الشريط الدوار والأولوية الشفعية أو أية تركيبة منهما،
- عادةً ما تُستعمل خوارزمية الشريط الدوار معه.
- المشكلة الوحيدة في نموذج TCB هو التأخير الزمني الكبير الذي تتطلبه عملية الجدولة إذا كان عدد الإجراءات المنشأة كبيراً.
- ينشئ النظام بنية معطيات خاصة (تسجيلة record) لكل إجراء يعمل في الذاكرة.
- تسمى "كتلة تحكم الإجراء" Task Control Block،
- تحتوي على الأقل على المعلومات التالية:
- قيمة سجل عداد البرنامج PC
- قيم سجلات المعالج في اللحظة التي قوطع فيها هذا الإجراء (السياق)
- رقم أو اسم تعريف للإجراء
- حالة الإجراء (جاهز، متوقف، في حالة سبات، ...)
- أولوية الإجراء (في حال استعمال مفهوم الأولوية)
- يخزن النظام كتل التحكم هذه في بنية معطيات مناسبة (لائحة مترابطة linked-list)

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نموذج كتلة تحكم الإجراء (TCB) Task Control Block:

#### • أهم الطرق المستخدمة:

#### • حالات الإجراء:

• يدير نظام التشغيل الإجراءات بحفظ حالة كل منها في كتلة تحكمه.

• عادة ما يكون الإجراء في إحدى الحالات الأربع التالية:

• قيد التنفيذ `executing`

• الإجراء الذي ينفّذه المعالج في هذه اللحظة

• إذا كان النظام متعدد المعالجات، يمكن لعدة إجراءات أن تكون في حالة "قيد التنفيذ"

• جاهز للتنفيذ `ready`

• الإجراءات التي يمكن أن تنتقل لحالة "قيد التنفيذ" لكنها ليست "قيد التنفيذ"

• متوقف `suspended` (أو مجمّد `blocked`)

• الإجراءات التي تنتظر

• توفر مصدر محدد، فهي بالتالي ليست "جاهزة للتنفيذ".

• عندما يتوفر هذا المصدر، ينتقل الإجراء لحالة "جاهز للتنفيذ"

• في سبات `dormant` (أو نائم `sleeping`)

• إجراء موجود لكنه غير متاح لمجدول نظام التشغيل، لامتلاء جدول كتل التحكم.

• عند إنشاء إجراء جديد، يمكن أن يوضع في حالة سبات إلى أن يتوقف أحد الإجراءات الأخرى ويصبح مكانه متاحاً في جدول كتل التحكم.

• عندها ينتقل من حالة سبات إلى حالة "جاهز للتنفيذ"

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نموذج كتلة تحكم الإجراء (TCB):

#### • أهم الطرق المستخدمة:

#### • إدارة الإجراءات:

#### • يعتبر نظام التشغيل على أنه الإجراء ذو الأولوية الأعلى في النظام

#### • يحتفظ نظام التشغيل بلانحتين مترابطتين من كتل التحكم.

#### • الأولى للإجراءات الجاهزة

#### • الثانية للإجراءات المتوقفة.

#### • ويحتفظ كذلك بجدول للمصادر المتاحة وآخر لطلبات المصادر التي طلبتها الإجراءات

#### • نموذج TCB مناسب عندما لا يكون عدد إجراءات النظام محدداً خلال مرحلة تصميمه، أو يمكن أن يتغير عددها أثناء عمله.

#### • أي أنه نموذج مرن جداً

#### • الطريقة الأبسط لعمل المجدول في هذا النموذج هو على الشكل التالي:

#### • عند استدعائه (دوري أو عند حدوث حدث)، يفحص المجدول اللائحة المترابطة للإجراءات الجاهزة للتنفيذ.

#### • إذا وجد إجراء في هذه اللائحة، عندها تُنقل كتلة تحكم الإجراء الذي كان قيد التنفيذ إلى آخر لائحة الإجراءات الجاهزة،

#### • ينتقي المجدول أحد الإجراءات الجاهزة للتنفيذ لنقله إلى حالة "قيد التنفيذ".

#### • يمكن تبسيط عملية إدارة الإجراءات بتغيير حالتها فقط دون نقلها من لائحة مترابطة لأخرى

# المكونات الأساسية للنظم المضمنة في الزمن الحقيقي

## • المكونات البرمجية للأنظمة المضمنة في الزمن الحقيقي:

### • نظم تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نواة نظام تشغيل الزمن الحقيقي:

#### • نموذج كتلة تحكم الإجراء (TCB) Task Control Block:

#### • أهم الطرق المستخدمة:

#### • إدارة المصادر:

- بالإضافة إلى عملية الجدولة، يهتم نظام التشغيل بمعرفة حالة كل مصدر متاح في النظام (جهاز دخل/خرج، ذاكرة، ...)
- يحتفظ بمعلومات عنها في جدول خاص اسمه "جدول المصادر".
- يفحص النظام دورياً حالة الإجراءات الموجودة في رتل الإجراءات المتوقفة.
- إذا وجد إجراءً متوقفاً لأنه ينتظر توفر مصدر ما، ووجد أن هذا المصدر أصبح متوفراً،
  - عندها يغير حالته إلى "جاهز للتنفيذ"
  - وينقل كتلة تحكمه إلى رتل الإجراءات الجاهزة للتنفيذ.