

Sensor-IA: Sistema experto para el control en tiempo real de procesos de mecanizado

Francisco J. Martín Mateos

Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Sevilla

Objetivo del proyecto

- Implementar un aplicación que automatice el control de ajuste manual de una fresadora KONDIA K600 que desarrolla procesos de mecanizado.
- Equipo interdisciplinar:
 - Ingeniero Mecánico: Conocimiento experto del sistema.
 - Ingeniero Informático: Desarrollo de la interfaz de usuario y de comunicación.
 - Ingeniero del Conocimiento: Desarrollo del sistema basado en conocimiento.

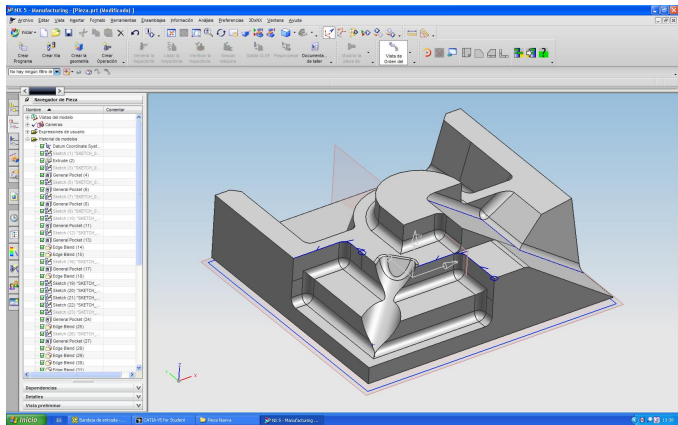
Proceso de mecanizado



- Fresadora KONDIA 600.

Proceso de mecanizado

- Se diseña una pieza.



Programa de corte

```
N0003 G53
N0010 G40 G17 G90 G71
N0020 G91 G28 Z0.0
N0030 T2.2 M06
N0040 G00 G90 X58.712 Y92.303 S1000 M03
N0050 G43 Z9.5
N0060 Z-.8
N0070 Y92.444
N0080 Z-3.283
N0090 Y92.586
N0100 Z-3.602
N0110 Y92.786
...
N0570 G00 Z-7.5
N0580 Z9.5
N0590 M02
```

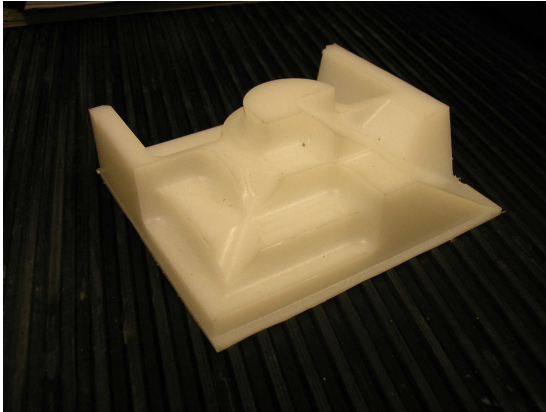
- Se genera un programa de corte.

Proceso de mecanizado

- Se carga el programa en el control de la fresadora.



- La fresadora corta la pieza.



Proceso de mecanizado

- Problemas:
 - Calentamiento.
 - Vibraciones.
 - Fatiga.
- Consecuencias:
 - Mecanizado defectuoso.
 - Rotura de piezas.
 - Rotura de brocas.



Proceso de mecanizado

- Eventualmente son necesarios ciertos ajustes manuales para salvaguardar el funcionamiento de la fresadora.
- Estos ajustes manuales consisten en modificar la velocidad de desplazamiento y/o de giro de la máquina y evitan problemas de calentamiento, vibración y deformación.



Objetivo del proyecto

- Implementar un aplicación que automatice el control de ajuste manual de una fresadora KONDIA K600 que desarrolla procesos de mecanizado.
 - En la fresadora se instalarán una serie de sensores para captar información de distinto tipo.
 - La aplicación se encargará de modificar de forma automática la velocidad de desplazamiento y/o de giro de la máquina, así como actuar sobre el caudal de refrigerante.
 - Se usará un sistema experto desarrollado en base al conocimiento de un experto en procesos de mecanizado.

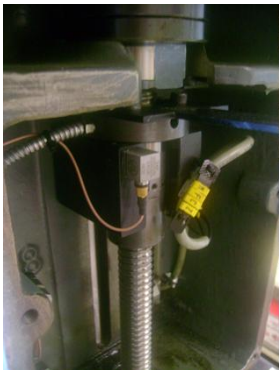
Sensores incorporados

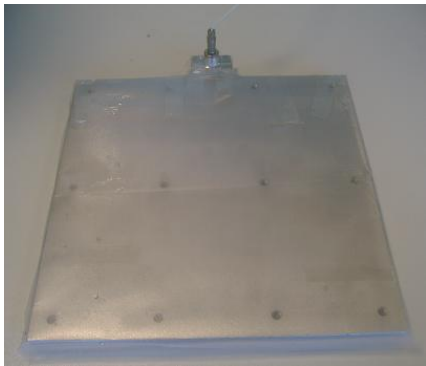


- Sensor térmico.

Sensores incorporados

- Sensores de vibración.



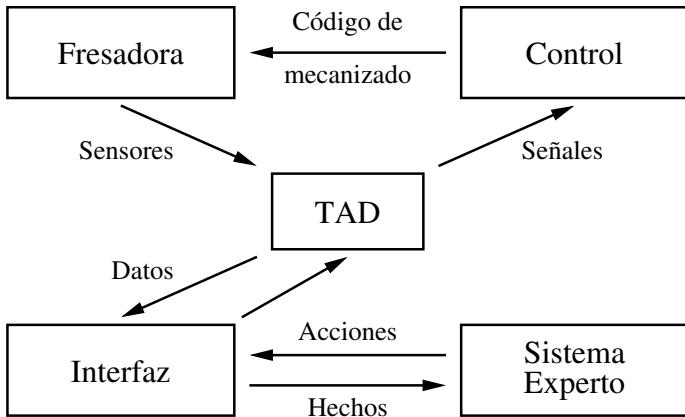


- Sensor de fuerza.

- Las características consideradas han sido cuatro.
 - Temperatura: Registrada directamente por el sensor de temperatura
 - Fuerza: Registrada directamente por el sensor de fuerza.
 - Vibración: Dato combinado obtenido de los dos sensores de vibración.
 - Deformación: Obtenido a partir de la información de los sensores.
- Cada característica toma valores *continuos* dentro de un amplio rango de variación.
 - Se definen 6 *niveles* o subrangos dentro del rango de variación.
 - Se mantiene información sobre el nivel en los 5 últimos ciclos de tiempo (*historia*).
 - El *estado* se define a partir del último par de niveles distintos en la *historia* en los que ha estado una característica.

- Las *reglas de decisión* sugieren acciones sobre los controles manuales de la máquina.
 - Estas reglas se definen en función del estado de las características.
 - Se establecen tres niveles de riesgo asumido o modos de uso de la aplicación.
 - Cada característica tiene asociado un conjunto de reglas de decisión.
- Pueden generarse simultáneamente varios ajustes sobre un mismo control manual de la máquina, uno por cada una de las características consideradas.
 - El ajuste efectivo sugerido para cada control se obtiene como una suma ponderada de todos los ajustes sugeridos para dicho control.

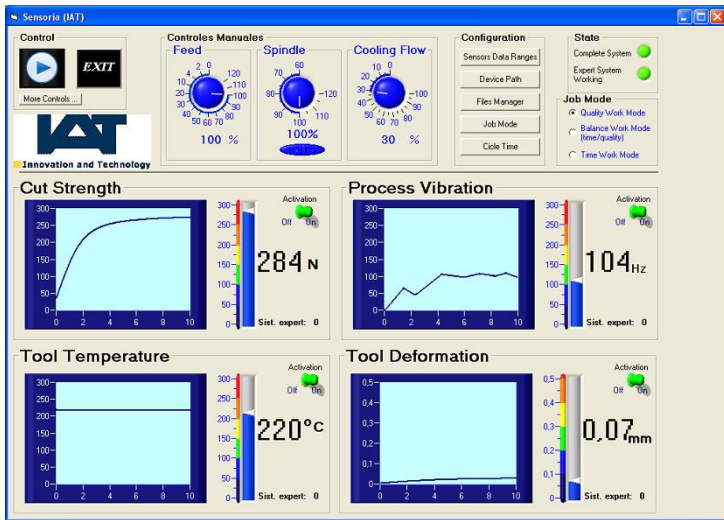
Ciclo de funcionamiento



La interfaz de usuario

- La interfaz de usuario es el elemento central de la aplicación.
 - Recibe la información de los sensores a través de la tarjeta de adquisición de datos.
 - Envía los valores de las características analizadas al sistema experto.
 - Recoge las acciones sugeridas por el sistema experto.
 - Envía señales que actúan sobre los controles manuales de la máquina.
- La interfaz se ha desarrollado en Visual Basic 6.0, para el que se disponía de módulos para procesar la información enviada por la tarjeta de adquisición de datos, inicializar y comunicarse con el gestor de sistemas expertos CLIPS y enviar señales a los controles manuales de la máquina.

La interfaz de usuario



El sistema experto

- La inicialización del sistema experto se realiza desde la interfaz:
 - Se pone en marcha el gestor de sistemas expertos CLIPS
 - Se carga el sistema experto: `(load "sensoria.clp")`
 - Se inicializa el sistema experto: `(reset)`
- Periódicamente se procesan los valores de las características.
- La comunicación con el sistema experto también se realiza desde la interfaz.
 - Se envían los valores de las características en forma de hechos:
`(valor temperatura 175)`
 - Se pone en funcionamiento el sistema experto: `(run)`
 - Se recogen los ajustes efectivos de variables globales CLIPS.

El sistema experto

- En cada ciclo de ejecución el sistema experto recibe un valor para cada una de las características analizadas.
 - Cada característica es procesada de forma independiente, esto permite activar o desactivar el envío de la información correspondiente a cada característica o incluir nuevas (procedentes de nuevos sensores) sin que esto afecte al comportamiento del sistema experto.
- Como resultado final, el sistema experto sugiere ajustes efectivos sobre los controles manuales de la máquina, que se almacenan en variables globales CLIPS.

Registrando el nivel de las características

```
(defrule actualiza-historia-nivel-dato-2
  (declare (salience 100))
  ?h1 <- (valor ?dato ?v)
  (niveles-riesgo ?dato ? ?12&:(<= ?12 ?v) ?13&:(< ?v ?13) $?)
  ?h2 <- (historia-nivel ?dato ? ?v3 ?v2 ?v1 ?v0)
  =>
  (retract ?h1 ?h2)
  (assert (historia-nivel ?dato ?v3 ?v2 ?v1 ?v0 2)))
```

- La variable `?dato` puede tomar los valores `temperatura`, `fuerza`, `vibracion` o `deformacion`.
- El hecho `(valor ?dato ?v)` indica el valor actual del `?dato`.
- El hecho `(niveles-riesgo ?dato ? ? ? ? ? ?)` tiene información sobre los subrangos establecidos para el `?dato`.
- El hecho `(historia-nivel ?dato ? ? ? ? ?)` tiene información sobre los últimos 5 niveles en los que ha estado el `?dato`.

Registrando el estado de las características

```
(defrule establece-estado-dato-1
  (declare (salience 100))
  (historia-nivel ?dato ? ? ?v1 ?v0&~?v1)
  ?h <- (estado ?dato ? ?v1)
  =>
  (retract ?h)
  (if (< ?v1 ?v0)
      then (assert (estado ?dato (- ?v0 1) ?v0))
      else (assert (estado ?dato (+ ?v0 1) ?v0))))

(defrule establece-estado-dato-5
  (declare (salience 100))
  (historia-nivel ?dato ?v0 ?v0 ?v0 ?v0 ?v0)
  ?h <- (estado ?dato ~?v0 ?v0)
  =>
  (retract ?h)
  (assert (estado ?dato ?v0 ?v0)))
```

- El hecho `(estado ?dato ?v1 ?v0)` contiene información sobre el nivel actual `?v0` del `?dato` y el nivel anterior o posterior `?v1` en función de si el último nivel distinto de `?v0` fué menor o mayor que `?v0`.

Reglas de decisión

```
(defrule regla-temperatura-8[1]
  (estado temperatura 4 5)
  (control caudal ?v&:(< ?v 15))
  =>
  (assert (accion temperatura 4 5 caudal (+ ?v 5))))

(defrule regla-temperatura-8[23]-S
  (estado temperatura 4 5)
  (control caudal 15)
  (control controls ?v&:(> ?v 90))
  =>
  (assert (accion temperatura 4 5 controls (- ?v 5))))
```

- Los hechos `(control ?control ?v)` almacenan información sobre el estado de los controles de ajuste manual.
- Las acciones `(accion ?dato ?v1 ?v0 ?control ?v)` indican la acción sugerida sobre el `?control` por el `?dato` en el estado `?v1 ?v0`.

El sistema experto

	A	D	G	H	I	J
1	Vibración 1					
2	ESTADO	vibracion1 pieza	Nivel de riesgo asociado	ACCION1 r.p.m	ACCION2 mm/min	ACCION3 l/min
3	BLOQUE 1	1	1			
4		1	2			
5		1	3			
6	BLOQUE 2	2 → 1	1			
7		2 → 1	2			
8		2 → 1	3			
9	BLOQUE 3	2	1	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
10		2	2	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
11		2	3	↑ ↓ 5% S hasta 100%		↑ ↓ 5% hasta 5%
12	BLOQUE 4	2 → 3	1	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
13		2 → 3	2	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
14		2 → 3	3	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
15	BLOQUE 5	3	1	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
16		3	2	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
17		3	3	↑ ↓ 5% S hasta 100%	↑ ↓ 10% F hasta 100%	↑ ↓ 5% hasta 5%
18	BLOQUE 6	3 → 4	1		↓ 10% F hasta 90%	
19		3 → 4	2		↓ 10% F hasta 90%	
20		3 → 4	3			
21	BLOQUE 7	4	1	↑ ↓ 5% S hasta 105%	↑ ↓ 10% F hasta 80%	↑ ↓ 5% hasta 5% solo si F o S cambian
22		4	2	↑ ↓ 5% S hasta 105%		↑ ↓ 5% hasta 5% solo si F o S cambian
23		4	3	↑ ↓ 5% S hasta 105%		↑ ↓ 5% hasta 5% solo si F o S cambian

Reglas de decisión

```
(defrule regla-vibracion-7[1]
  (estado vibracion 4 4)
  (riesgo-asumido 1)
  (control controlS ?vs)
  (control controlF ?vf)
  (control caudal ?vc)
  (test (or (<> ?vs 95) (<> ?vf 70)))
  =>
  (if (<> ?vs 95)
    then (assert (accion vibracion 4 4
                      controlS (ajuste ?vs 5 95))))
  (if (<> ?vf 80)
    then (assert (accion vibracion 4 4
                      controlF (ajuste ?vf 10 80))))
  (if (<> ?vc 5)
    then (assert (accion vibracion 4 4
                      caudal (ajuste ?vc 5 5)))))
```

El sistema experto

- Combinación de las acciones de todos los datos:
 - Suma ponderada de todas las acciones sugeridas para dicho control.
- La acción efectiva se lee desde la interfaz, desde la que se modifican los controles de la máquina.
- El estado del sistema experto se guarda de un ciclo de ejecución para el siguiente.

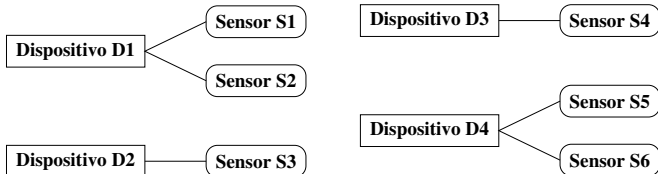
- Complejidad del sistema experto:
 - 133 Reglas: 17 reglas de control y 116 reglas de decisión.
 - 8 Funciones.
 - 6 Variables globales.
 - 3 Conjuntos de hechos.

Sensor-IA: Objetivos alcanzados

- Representación en forma de reglas del conocimiento experto sobre el control de la herramienta de mecanizado.
- Independencia de la cantidad de datos de entrada.
 - Permite activar o desactivar los sensores.
 - Permite incluir nuevas fuentes de datos.
- Minimización del número de cambios entre consultas sucesivas al sistema experto.
- El sistema se puede implantar en cualquier máquina de fabricación conectada a un dispositivo de control.
- Tratamiento de información interna ofrecida por el control o externa procedente de los sensores.
- Se puede actuar sobre diversos elementos del proceso de mecanizado.
- Resultados satisfactorios en las pruebas realizadas.

Ejercicio práctico: sistemas de control

- Sistema formado por 4 dispositivos con sensores asociados:



- Sensor:
 - Límite Crítico Alto.
 - Límite Peligroso Alto.
 - Límite Peligroso Bajo.
 - Límite Crítico Bajo.
- Límites asociados a los sensores:

Sensor	LCA	LPA	LPB	LCB	N
S1	130	120	70	60	3c
S2	180	160	40	20	5c
S3	130	120	70	60	4c
S4	135	120	70	60	4c
S5	125	120	70	65	4c
S6	130	125	115	110	2c

Ejercicio práctico: sistemas de control

- Fuente de datos: Hechos, sensores, usuarios, ficheros, ...
- Valores de los sensores por ciclos:

Sensor	Ciclo1	Ciclo2	Ciclo3	Ciclo4	Ciclo5	Ciclo6
S1	100	100	110	110	115	120
S2	110	120	125	130	130	135
S3	100	120	125	130	130	125
S4	120	120	120	125	130	135
S5	110	120	125	130	135	135
S6	115	120	125	135	130	135

- Dispositivos:
 - Estado crítico: Sensor asociado con $\text{Valor} \geq \text{LCA}$ o $\text{Valor} \leq \text{LCB}$. Desconectar dispositivo.
 - Estado peligroso: Sensor asociado con $\text{LCA} > \text{Valor} \geq \text{LPA}$ o $\text{LPB} \geq \text{Valor} > \text{LCB}$. Desconectar dispositivo si la situación se mantiene durante N ciclos.

Ejercicio práctico: sistemas de control

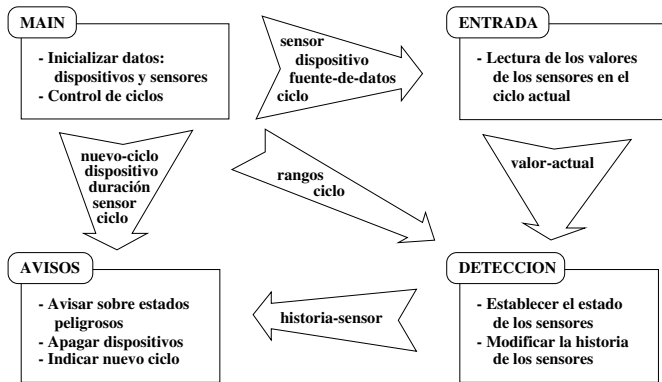
- Ciclo de ejecución:
 - Leer datos de entrada.
 - Detectar estados de los dispositivos.
 - Realizar acciones.
- Final:
 - Todos los dispositivos desconectados.
 - Límite de ciclos.
 - Ciclo infinito (Tiempo real).

Ejercicio práctico: sistemas de control

- Trazas de la ejecución:

```
CLIPS> (load "monitor.clp")
...
CLIPS> (run)
Ciclo 1 - Sensor S6 en peligroso-bajo durante 1 ciclos.
Ciclo 1 - Sensor S4 en peligroso-alto durante 1 ciclos.
Ciclo 2 - Sensor S5 en peligroso-alto durante 1 ciclos.
Ciclo 2 - Sensor S3 en peligroso-alto durante 1 ciclos.
Ciclo 2 - Sensor S4 en peligroso-alto durante 2 ciclos.
Ciclo 3 - Sensor S6 en peligroso-alto durante 1 ciclos.
Ciclo 3 - Sensor S5 en critico-alto.
  Apagar el dispositivo D4.
Ciclo 3 - Sensor S4 en peligroso-alto durante 3 ciclos.
Ciclo 3 - Sensor S3 en peligroso-alto durante 2 ciclos.
Ciclo 4 - Sensor S3 en critico-alto.
  Apagar el dispositivo D2.
Ciclo 4 - Sensor S4 en peligroso-alto durante 4 ciclos.
  Apagar el dispositivo D3.
Ciclo 6 - Dispositivo D4 inactivo. Sensores asociados normales.
  Encender el dispositivo D4.
Ciclo 6 - Sensor S1 en peligroso-alto durante 1 ciclos.
```

Ejercicio práctico: sistemas de control



- Martín, F.J.; González, L.C. y Serrano, R.
“Expert System to Real Time Control of Machining Processes”,
LNAI 5988:281–290, Springer-Verlag, 2010.
- Serrano, R.; Gonzalez, L.C. y Martín, F.J.
“Architecture for the Optimization of a Machining Process in
Real Time through Rule-Based Expert System”, AIP Conference
Proceedings 1181:652–661, American Institute of Physics, 2009.