

Recepción: 07 de diciembre de 2014

Aceptación: 22 de diciembre de 2014

Publicación: 29 de diciembre de 2014

AVANCES EN CONTROL NUMÉRICO (CNC) EN SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE

ADVANCES IN NUMERICAL CONTROL (CNC) FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

Rafa Tortosa Guardiola¹

Víctor Cano García²

David Juárez Varón³

1. Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística. Ingeniero Técnico en Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: ratorgua@epsa.upv.es
2. Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística. Ingeniero Técnico en Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: vccagar@epsa.upv.es
3. Ingeniero en Organización Industrial. Doctor en Ingeniería (programa del dpto. de Ingeniería Mecánica y Materiales). Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: djuarez@mcm.upv.es

RESUMEN

En el siguiente artículo se van a tratar las últimas novedades tecnológicas del sistema CNC, es decir, cuales las tendencias o sectores que actualmente se están estudiando para intentar mejorarlo. Se va a llevar a cabo una breve descripción de su funcionamiento, aplicaciones y algunas de sus características generales, y a continuación se explicará cada uno de los avances o mejoras en las que se está trabajando actualmente.

ABSTRACT

In the following article are going to be treat the latest technology of CNC system, which trends or sectors are currently being studied to try to improve it. Out it will take a brief description of its operation, applications and some of its general features, and then explain each of the advances and improvements which are currently working.

PALABRAS CLAVE

CNC, tecnología, SFF, funciones, avances

KEY WORDS

CNC, technology, FMS, functions, advances

INTRODUCCIÓN

El control numérico o control decimal numérico es un sistema de automatización de máquinas herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, en comparación con el mando manual mediante volantes o placas.

Las primeras máquinas de control numérico se construyeron en los años 1940 y 1950, basadas en las máquinas existentes con motores modificados cuyos mandos se accionaban automáticamente siguiendo las instrucciones dadas en un sistema de tarjeta perforada. Estos servomecanismos iniciales se desarrollaron rápidamente con equipos analógicos y digitales. El abaratamiento y miniaturización de los microprocesadores ha generalizado la electrónica digital en las máquinas herramienta, lo que dio lugar a la denominación control decimal numérico, control numérico por computadora, control numérico por computador o control numérico computarizado (CNC), para diferenciarlas de las máquinas que no tenían computadora. En la actualidad se usa el término control numérico para referirse a este tipo de sistemas, con o sin computadora.

Este sistema ha revolucionado la industria debido al abaratamiento de microprocesadores y a la simplificación de la programación de las máquinas de CNC.

DESARROLLO

APLICACIONES

Aparte de aplicarse en las máquinas-herramienta (torno, fresadora, taladro...) para modelar metales, el CNC se usa en la fabricación de muchos otros productos de ebanistería, carpintería, etc.

La aplicación de sistemas de CNC en las máquinas-herramienta ha hecho aumentar enormemente la producción, al tiempo que ha hecho posible efectuar operaciones de conformado que era difícil de hacer con máquinas convencionales, por ejemplo la realización de superficies esféricas manteniendo un elevado grado de precisión dimensional.

Finalmente, el uso de CNC incide favorablemente en los costos de producción al propiciar la baja de costes de fabricación de muchas máquinas, manteniendo o mejorando su calidad.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para mecanizar una pieza se usa un sistema de coordenadas que especificarán el movimiento de la herramienta de corte.

El sistema se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático ejecutado por un ordenador.

En el caso de un torno, hace falta controlar los movimientos de la herramienta en dos ejes de coordenadas: el eje de las X para los desplazamientos longitudinales del carro y el eje de las Z para los desplazamientos transversales de la torre.

En el caso de las fresadoras se controlan también los desplazamientos verticales, que corresponden al eje Y. Para ello se incorporan servomotores en los mecanismos de desplazamiento del carro y la torreta, en el caso de los tornos, y en la mesa en el caso de la fresadora; dependiendo de la capacidad de la máquina, esto puede no ser limitado únicamente a tres ejes.

PROGRAMACIÓN EN EL CONTROL NUMÉRICO

Se pueden utilizar dos métodos, la programación manual y la programación automática.

PROGRAMACIÓN MANUAL

En este caso, el programa pieza se escribe únicamente por medio de razonamientos y cálculos que realiza un operario. El programa de mecanizado comprende todo el conjunto de datos que el control necesita para la mecanización de la pieza.

Al conjunto de informaciones que corresponde a una misma fase del mecanizado se le denomina bloque o secuencia, que se numeran para facilitar su búsqueda. Este conjunto de informaciones es interpretado por el intérprete de órdenes. Una secuencia o bloque de programa debe contener todas las funciones geométricas, funciones máquina y funciones tecnológicas del mecanizado. De tal modo, un bloque de programa consta de varias instrucciones.

El comienzo del control numérico ha estado caracterizado por un desarrollo anárquico de los códigos de programación. Cada constructor utilizaba el suyo particular. Posteriormente, se vio la necesidad de normalizar los códigos de programación como condición indispensable para que un mismo programa pudiera servir para diversas máquinas con tal de que fuesen del mismo tipo. Los caracteres más usados comúnmente, regidos bajo la norma DIN 66024 y 66025 son, entre otros, los siguientes:

- N: es la dirección correspondiente al número de bloque o secuencia. Esta dirección va seguida normalmente de un número de tres o cuatro cifras. En el caso del formato N03, el número máximo de bloques que pueden programarse es 1000 (N000 hasta N999).
- X, Y, Z: son las direcciones correspondientes a las cotas según los ejes X, Y, Z de la máquina herramienta (Y planos cartesianos). Dichas cotas se pueden programar en forma absoluta o relativa, es decir, con respecto al cero pieza o con respecto a la última cota respectivamente.
- G: es la dirección correspondiente a las funciones preparatorias. Se utilizan para informar al control de las características de las funciones de mecanizado, como por ejemplo, forma de la trayectoria, tipo de corrección de herramienta, parada temporizada, ciclos automáticos, programación absoluta y relativa, etc. La función G va seguida de un número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones preparatorias diferentes.
- M: es la dirección correspondiente a las funciones auxiliares o complementarias. Se usan para indicar a la máquina herramienta que se deben realizar operaciones tales como parada programada, rotación del husillo a derechas o a izquierdas, cambio de útil, etc. La dirección m va seguida de un número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones auxiliares diferentes.

- F: es la dirección correspondiente a la velocidad de avance. Va seguida de un número de cuatro cifras que indica la velocidad de avance en mm/min.
- S es la dirección correspondiente a la velocidad de rotación del husillo principal. Se programa directamente en revoluciones por minuto, usando cuatro dígitos.
- I, J, K son direcciones utilizadas para programar arcos de circunferencia. Cuando la interpolación se realiza en el plano X-Y, se utilizan las direcciones I y J. Análogamente, en el plano X-Z, se utilizan las direcciones I y K, y en el plano Y-Z, las direcciones J y K.
- T es la dirección correspondiente al número de herramienta. Va seguido de un número de cuatro cifras en el cual los dos primeros indican el número de herramienta y los dos últimos el número de corrección de las mismas.

PROGRAMACIÓN AUTOMÁTICA

En este caso, los cálculos los realiza un computador a partir del modelo de CAD generado por un software CAD/CAM que posteriormente será traducido mediante un post-procesador al lenguaje máquina adecuado para cada control por Computadora. En la actualidad es el sistema utilizado en la mayoría de los casos, no tiene sentido programar manualmente ya que el tiempo empleado será mucho mayor además de que la tasa de error aumenta considerablemente al ser una persona la encargada de dicho trabajo.

ÚLTIMOS AVANCES

A continuación se van a nombrar y explicar aquellas novedades o investigaciones tecnológicas que se están llevando a cabo en los últimos años para mejorar y sacar mayor rendimiento al sistema CNC.

FPGA HARDWARE INTERPOLADOR DE CURVAS

Una FPGA [1] (del inglés Field Programmable Gate Array) es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.

Las FPGAs se utilizan en aplicaciones similares a los ASICs sin embargo son más lentas, tienen un mayor consumo de potencia y no pueden abarcar sistemas tan complejos como ellos. A pesar de esto, las FPGAs tienen las ventajas de ser reprogramables (lo que añade una enorme flexibilidad al flujo de diseño), sus costes de desarrollo y adquisición son mucho menores para pequeñas cantidades de dispositivos y el tiempo de desarrollo es también menor.

La trayectoria de interpolación de la herramienta es una parte importante de los sistemas computarizados de control numérico (CNC), ya que está relacionada con la precisión de

mecanizado, suavidad de la herramienta de movimiento y la eficiencia en general. El uso de curvas paramétricas para generar las trayectorias de movimiento de una pieza para el mecanizado de alta precisión, se ha convertido en un formato de datos estándar, que se utiliza para los sistemas CAD / CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) y para las Splines, Bezier, B-splines y NURBS (Non - Uniform Rational B-splines), que son las técnicas paramétricas comunes que se utiliza para el diseño de trayectoria de la herramienta.

La realización de este tipo de interpolación supone: por un lado una alta carga computacional, y por otro lado en el mejor de los casos se llega a implementar únicamente un algoritmo de interpolación. La contribución de este trabajo es el desarrollo de una unidad de procesamiento de hardware basado en matrices de puertas programables (FPGA) para máquinas industriales CNC. El FPGA es un dispositivo electrónico capaz de implementar las cuatro técnicas principales de interpolación. Permite la selección de la técnica de interpolación según la aplicación requerida.

Hasta ahora este tipo de técnicas paramétricas se había ejecutado a través de un PC o a través de un DSP (Digital Signal Processor). Es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real.

El objetivo del artículo es demostrar la mayor eficiencia para el diseño de modelos CAD que tiene el hardware FPGA respecto a los PC y sistemas DSP. Para ello se aplicarán las diferentes técnicas en los diferentes dispositivos para dos elementos CAD dados.

TÉCNICAS DE INTERPOLACIÓN

La spline, Bezier, técnicas B-spline y de interpolación NURBS han sido ampliamente empleadas para la generación de la trayectoria debido a su suavidad y porque hay métodos numéricos para interpolarlos.

- Splines

En el subcampo matemático del análisis numérico, un spline es una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios.

En los problemas de interpolación, se utiliza a menudo la interpolación mediante splines porque da lugar a resultados similares requiriendo solamente el uso de polinomios de bajo grado, evitando así las oscilaciones, indeseables en la mayoría de las aplicaciones, encontradas al interpolar mediante polinomios de grado elevado.

Para el ajuste de curvas, los splines se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los splines los hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador.

- Bezier

Se denomina curvas de Bézier a un sistema que se desarrolló hacia los años 1960 para el trazado de dibujos técnicos, en el diseño aeronáutico y en el de automóviles. Su denominación es en honor a Pierre Bézier, quien ideó un método de descripción matemática de las curvas que se comenzó a utilizar con éxito en los programas de CAD.

Según el tipo de función de la curva, podemos subdividir las curvas Bezier en:

- Lineales
- Definidas por dos puntos en el plano
- Cuadráticas
- Definidas por tres puntos en el plano
- Cúbicas
- Definidas por cuatro puntos en el plano

- B – Splines

En el subcampo matemático de análisis numérico, una B-spline o Basis spline (o traducido una línea polinómica suave básica), es una función spline que tiene el mínimosoporte con respecto a un determinado grado, suavidad y partición del dominio.

- NURBS

Una curva NURBS se define por su grado, un conjunto de puntos de control ponderados, y un vector de nodos. Las curvas y superficies NURBS son generalizaciones de curvas B-splines y curvas de Bézier, así como de superficies, siendo su diferencia principal la ponderación de los puntos de control que hacen a las curvas NURBS racionales (las curvas B-splines racionales no uniformes son un caso especial de las curvas B-splines racionales). Mientras que las curvas de Bézier se desarrollan en una sola dirección paramétrica, normalmente llamada s o u , las superficies NURBS evolucionan en dos direcciones paramétricas, llamada s y t o u y v .

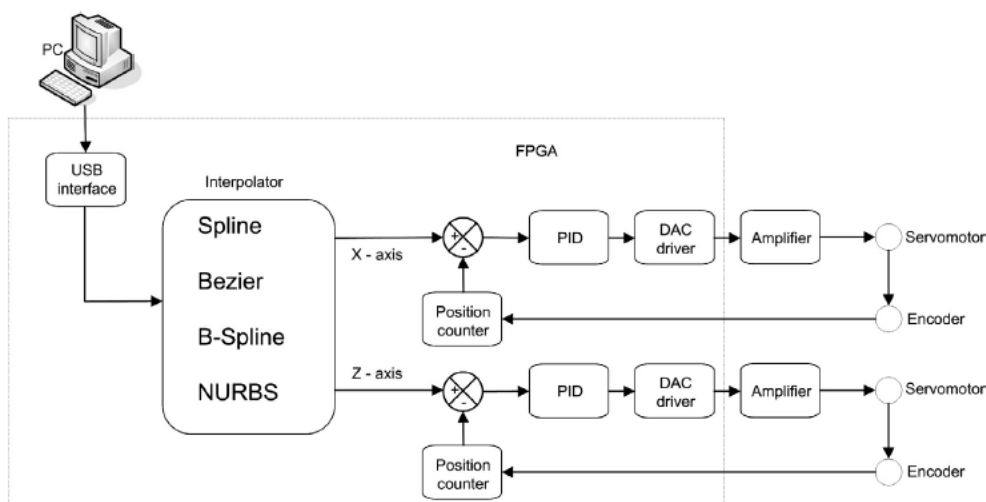


Figura 1. Curvas y superficies NURBS.

MODELOS CAD

Dos casos de estudio fueron diseñados con el fin de probar la eficiencia de las técnicas de interpolación implementadas en el sistema de control CNC [2]. El primer modelo es un arco de circunferencia, que es una trayectoria común en muchos ejemplos. El segundo modelo es una curva que presenta valores de curvatura mayor que el arco, donde se puede apreciar mayor variación en ambos ejes.

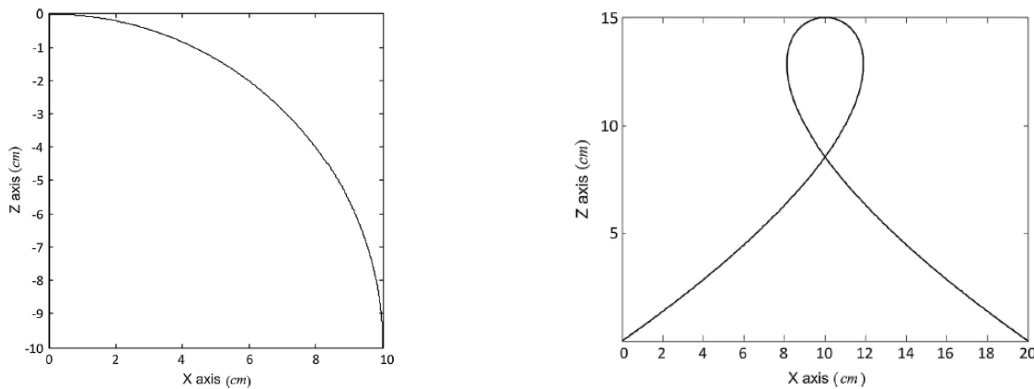


Figura 2. Modelos CAD.

Ambos modelos CAD se implementan para las cuatro curvas paramétricas con el parámetro respectivo para cada técnica de interpolación para comparar los resultados de cada una de ellas.

Case	Mean (μm)	Standard deviation (μm)
Spline	3.58	4.87
Bezier	3.16	3.40
B-Spline	3.53	4.72
NURBS	3.52	4.73

Tabla 1. Caso de estudio 1 – error de seguimiento.

Case	Mean (μm)	Standard deviation (μm)
Spline	15.45	17.09
Bezier	15.41	17.23
B-Spline	15.39	17.24
NURBS	15.31	17.32

Tabla 2. Caso de estudio 2 – error de seguimiento.

A partir de los resultados experimentales, podemos decir que para el primer caso, catalogado como una curva sencilla (arco), las técnicas presentan un error medio de alrededor de 3,1 - 3,5 μm , mientras que en el segundo caso obtenemos un error medio de 15,3 – 15,4 μm con un porcentaje de error de 0,004 – 0,015%.

El uso de hardware FPGA nos permite el cálculo de las trayectorias paramétricas en máquinas CNC industriales con todas las técnicas de interpolación juntas (Splines, Bezier, B-splines y NURBS). Además asegura un movimiento suave y controlado con efectos directos sobre la calidad de las piezas realizadas y la disminución de tiempo de producción.

La capacidad de procesamiento en tiempo real y su reconfigurabilidad en paralelo, permite el diseño y la aplicación de las diferentes técnicas las cuales suponen una carga computacional muy alta para cualquier dispositivo electrónico.

El sistema desarrollado permite la selección del apropiado técnica de interpolación de acuerdo con la aplicación específica.

Los errores [3, 4] en las trayectorias son mucho más pequeños que en otros dispositivos.

En el artículo presente se ha demostrado la eficiencia de dicho hardware en dos ejes de la máquina CNC, sin embargo se podría extender a más ejes [5-7] para un mayor desarrollo debido a su capacidad de reconfigurabilidad.

MODELADO Y PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL MECANIZADO EN PROCESO DE TORNEADO CNC USANDO HERRAMIENTAS DE TOMA DE DECISIONES INTELIGENTES

El proceso de toma de decisiones en el entorno de fabricación es cada vez más difícil debido a los cambios tan rápidos en el diseño y la demanda de productos de calidad. Para hacer el proceso de toma de decisiones [8] (selección de parámetros de mecanizado) se está intentando implantar herramientas de inteligencias artificiales en línea, eficaces y eficientes, como las redes neuronales. En este trabajo se propone el desarrollo de modelos de redes neuronales para la predicción de mecanizado en procesos de torneado CNC.

Los parámetros del proceso a analizar serán la velocidad de corte, avance, profundidad de corte y radio de punta, mientras que la rugosidad de la superficie y el consumo de energía serán los objetivos de análisis.

Entre los distintos modelos desarrollados de este tipo, el modelo de optimización con enjambre de partículas es superior a los demás, en términos de velocidad de cálculo y exactitud.

Se utilizará la relación señal/ruido para identificar la influencia de los parámetros anteriores.

El modelo desarrollado puede ser usado en las industrias de automoción para decidir los parámetros de mecanizado, para lograr la calidad con el consumo de energía mínimo y por lo tanto la máxima productividad.

El torneado es uno de los procesos de mecanizados importantes y ampliamente utilizados en las industrias de ingeniería. En torno, las condiciones de corte, como la velocidad, el avance, la profundidad de corte, características de las herramientas y materiales de la pieza de trabajo de corte afecta la eficiencia y el rendimiento de los procesos características. La

evaluación del rendimiento de torneado CNC se basa en las características de rendimiento como rugosidad de la superficie, la tasa de eliminación de material, desgaste de la herramienta, vida de la herramienta, la fuerza de corte y el consumo de energía.

Se han hecho muy pocas investigaciones para estimar la importancia de la energía requerida para el proceso de mecanizado.

El aumento reciente de la demanda de energía y las restricciones en el suministro de energía se convierte en una prioridad para la industria manufacturera. La calidad superficial es una característica muy importante para evaluar la productividad de las máquinas-herramienta, así como componentes mecanizados. La rugosidad superficial es el indicador fundamental de la calidad de las superficies mecanizadas.

En la industria de fabricación de hoy en día, se presta especial atención al acabado de la superficie y el consumo energético [9]. Por lo general, los parámetros de corte deseados se determinan en base a la experiencia del trabajador o por el simple uso de un manual que no garantiza un rendimiento óptimo.

Es necesario seleccionar los ajustes de mecanizado más adecuadas con el fin de mejorar la eficiencia del corte, proceso a bajo coste y producir productos de alta calidad. Por lo tanto, necesita también un modelo predictivo adecuado para estudios de procesos. Los investigadores intentan diferentes técnicas de modelado para investigar los parámetros del proceso de mecanizado.

Se han empleado técnicas de control de calidad, como experimento factorial, el diseño del experimento y el método de Taguchi para predecir la rugosidad superficial.

MODELOS DE REDES NEURONALES

El uso de modelos de redes neuronales es vital en el entorno de la fabricación moderna y flexible. Las redes neuronales son sistemas dinámicos que consisten en unidades de procesamiento llamadas neuronas, con conexiones ponderadas entre sí. Las redes neuronales pueden aprender, recordar y recuperar los datos.

Cada técnica inteligente tiene ciertas fortalezas y debilidades por lo que no se puede aplicarse una única a cualquier tipo de problemas. Esta limitación es el principal motivo que fuerza la creación de sistemas híbridos inteligentes donde dos o más técnicas se combinan de una manera que supere las limitaciones de las técnicas individuales. La motivación para la combinación de diferentes técnicas inteligentes es la multiplicidad de tareas de la aplicación, la mejora de la técnica y la realización de tareas multifuncionales.

Back propagation neural network model (BPNN)

Su procedimiento de aprendizaje se basa en la búsqueda de gradiente significativo con menor cantidad de criterios de optimización cuadrados.

Neural network model trained with genetic algorithm (NNGA)

Algoritmo genético se utiliza ampliamente para resolver problemas de optimización mediante técnicas heurísticas.

Neural network model trained with particle swarm optimization (NNPSO)

Desarrollo del experimento

Para comprobar la eficiencia de cada una de los métodos se va a proceder a aplicar distintas condiciones de corte en el torno de CNC FANUC de 7,5 kW de potencia y una velocidad máxima de 4500 rpm.

Para analizar la eficiencia del consumo de energía del proceso de corte se conectará un analizador FLUKE 43B a la fuente de alimentación de CNC del torno, mientras que para medir la rugosidad se utiliza la máquina Taylor-Hobson Talysurf.

Trial numbers	A	B	C	D	Power (W)	Surface roughness (μm)
1	1	1	1	1	213	2.04
2	1	1	2	2	320	1.74
3	1	1	3	3	332	2.02
4	1	2	1	2	283	1.25
5	1	2	2	3	340	1.1
6	1	2	3	1	393	1.02
7	1	3	1	3	275	1.5
8	1	3	2	1	350	1.12
9	1	3	3	2	620	1.35
10	2	1	1	2	392	1.82
11	2	1	2	3	438	1.52
12	2	1	3	1	441	1.78
13	2	2	1	3	391	1.04
14	2	2	2	1	570	0.84
15	2	2	3	2	668	1.02
16	2	3	1	1	394	1.16
17	2	3	2	2	617	1.26
18	2	3	3	3	760	1.48
19	3	1	1	3	448	2.02
20	3	1	2	1	516	1.54
21	3	1	3	2	585	1.94
22	3	2	1	1	476	1.08
23	3	2	2	2	625	1.16
24	3	2	3	3	765	1.42
25	3	3	1	2	528	1.46
26	3	3	2	3	706	1.38
27	3	3	3	1	873	1.64

Tabla 3. Diseño experimental y resultados.

A=Velocidad de corte

B=Velocidad de avance

C=Profundidad de corte

D=Radio de punta

Test no.	Cutting speed (m/s)	Feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Nose radius (mm)	Observed values	
					Power consumption (W)	Surface roughness (μm)
1	100	0.1	0.2	0.4	245	1.14
2	125	0.15	0.5	0.8	815	1.35
3	150	0.05	0.35	1.2	526	1.92

Tabla 4. Resultados del experimento.

Percentage of error BPNN model for		Percentage of error NNGA model for		Percentage of error NNPSO model for	
Power consumption	Surface roughness	Power consumption	Surface roughness	Power consumption	Surface roughness
2.94	-3.63	-1.606	-3.06	-1.6	-2.63
1.74	-9.39	1.49	4.92	0.617	-2.87
-1.68	4.43	-0.94	2.673	0.766	2.12

Tabla 5. Resultados de los modelos desarrollados en términos de error porcentual.

VALORACION DE RESULTADOS

El error de predicción computarizada utilizando NNPSO es menor en comparación con otros modelos desarrollados. La razón es que el modelo NNPSO busca solución en el espacio de búsqueda diferente de otros modelos de redes neuronales. Mantiene una memoria interna para almacenar las soluciones.

Pero el modelo NNGA busca iterativamente diferentes muestras, y emular todas las posibles mejores soluciones que se encuentran en dicha muestra. Por lo tanto, requiere de tiempo computacional considerable para llevar a cabo la toma de decisiones, mientras que la red de NNPSO puede converger a un conjunto de pesos subóptimos. Por lo tanto la efectividad del modelo de NNPSO en la búsqueda de la solución óptima global es mucho mayor que los otros modelos de redes neuronales.

El modelo de red neuronal NNPSO predice la salida con una precisión de error menor al 2% y requiere un número mínimo de etapas y por lo tanto el tiempo de cálculo requerido es menor.

Por otra parte podemos concluir que para el consumo de energía los factores más críticos son la velocidad de corte seguido de la profundidad de corte y por último el radio de punta, mientras que la velocidad de avance tiene un efecto significativo en la rugosidad de la superficie en el proceso de torneado CNC.

CONCLUSIONES

El crecimiento de una industria depende del proceso de toma de decisiones eficaz y eficiente. De ahí la gran importancia del desarrollo de herramientas de toma de decisiones inteligentes. En este trabajo se han estudiado las diferentes técnicas de decisión NNBP, NNGA y NNPSO para la optimización de los parámetros de mecanizado en operaciones de torneado CNC.

En el uso de técnicas no-convencionales, NNPSO siempre produce mejores resultados. Por lo tanto, se sugiere utilizar NNPSO para la resolución de problemas de las operaciones de torneado. Los resultados obtenidos en este trabajo están destinados para el uso de control numérico.

REFERENCIAS

1. De Santiago-Perez, J.J., et al., *FPGA-based hardware CNC interpolator of Bezier, splines, B-splines and NURBS curves for industrial applications*. Computers & Industrial Engineering, 2013. **66**(4): p. 925-932.
2. Zhang, Q. and S.-R. Li, *Efficient computation of smooth minimum time trajectory for CNC machining*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **68**(1-4): p. 683-692.
3. Sortino, M., et al., *Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by means of 3D workpiece model adaptation*. Computer-Aided Design, 2014. **48**: p. 28-38.
4. Miao, E.-M., et al., *Robustness of thermal error compensation modeling models of CNC machine tools*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **69**(9-12): p. 2593-2603.
5. Farouki, R.T. and S. Li, *Optimal tool orientation control for 5-axis CNC milling with ball-end cutters*. Computer Aided Geometric Design, 2013. **30**(2): p. 226-239.
6. Wang, F., et al., *Design and implementation of five-axis transformation function in CNC system*. Chinese Journal of Aeronautics, 2014. **27**(2): p. 425-437.
7. Han, Q. and R. Liu, *Theoretical model for CNC whirling of screw shafts using standard cutters*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **69**(9-12): p. 2437-2444.
8. Ahilan, C., et al., *Modeling and prediction of machining quality in CNC turning process using intelligent hybrid decision making tools*. Applied Soft Computing, 2013. **13**(3): p. 1543-1551.
9. Sparham, M., et al., *Designing and manufacturing an automated lubrication control system in CNC machine tool guideways for more precise machining and less oil consumption*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. **70**(5-8): p. 1081-1090.