

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO DIGITALIZADOR COMO MÁQUINA DE COORDENADAS MANUAL PARA LA CAPTURA DE OBJETOS 3D

Fco. Eugenio López Guerrero, Pedro Nicolás Garza Patrón, Francisco Ramírez Cruz  
Cuerpo Académico de Sistemas Integrados de Manufactura.  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,  
Pedro de Alba s/n, CP. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.  
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904.  
Correo electrónico: [Prof.Dr.Elopez@gmail.com](mailto:Prof.Dr.Elopez@gmail.com)

### RESUMEN

En la tecnología de manufactura los mecanismos de medición 3D y reconstrucción geométrica juegan un papel clave. En los últimos diez años las técnicas 3D son cada vez más populares, sin embargo el mercado demanda que dichas técnicas sean baratas, rápidas y fáciles de lograr.

Este trabajo presenta el diseño y la construcción de un brazo digitalizador para ser utilizado en la digitalización y reconstrucción 3D. Describe la relación entre el diseño ideal por computadora y las desviaciones naturales del proceso de construcción. Para la calibración cinemática del brazo se utilizan las funciones de transformación geométrica 3D. La calibración de forma se logra a través de un cuadro experimental de mediciones utilizando un patrón de calibración. Como resultado se muestra la digitalización de un objeto 2D en el espacio R3.

**Palabras clave:** Máquinas de coordenadas, digitalizador 3D, ingeniería inversa.

### ABSTRACT

In manufacturing, the geometric reconstruction and measurement plays a key role. In the last ten years the 3D technology has become more popular, but the market demands such technology to be cheaper, faster and easier to use.

This work presents the design and construction of a measurement arm, to be used as a 3D scanner. The work also describes the relation between ideal design and natural production deviations. For the kinematic calibration 3D transformations were used. The form calibration is achieved through pattern measurement experiments. As preliminary result 2D scanned objects in R3 are presented.

**Keywords:** Coordinate Measuring Machines, 3D scanner, reverse engineering.

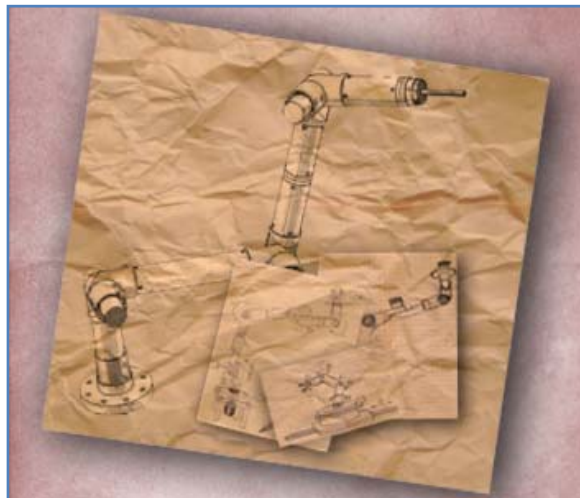


Figura 1.- Fotocomposición de los bosquejos preliminares hechos a mano y por computadora para el diseño del brazo digitalizador.

### INTRODUCCIÓN

La digitalización de geometrías tridimensionales se ha convertido en un proceso crítico que apoya fuertemente la manufactura. Hoy en día existe suficiente oferta de digitalizadores 3D en el mercado. Las limitaciones de dichos sistemas han sido objeto de investigaciones como las de [IUL10, HU12, WU11]. Aunque la implementación de dichas tecnologías ha llegado completamente a los trenes productivos [APU06, WIN06, REZ08], en el caso de México no han penetrado significativamente al mercado nacional. Ver la Prospectiva Tecnológica Industrial de México 2002-2012 en el Sector 8 Diseño y Automatización, área 8.1 Diseño.

El proceso de producción para objetos con superficies complejas [LI03, LEE05] permite {1} la digitalización de objetos con facilidades que implican usuarios con el mínimo de requerimientos cognitivos; ello abarata el proceso y permite una mejora de las características estéticas y funcionales del producto (optimización del proceso de diseño con la introducción de métodos de ingeniería inversa). {2} nuevas funciones para el diseño estilístico, para permitir mejores resultados: mejor calidad y menor tiempo invertido en el diseño y {3} una arquitectura

nueva de sistema tipo modular, que permitirá a las pequeñas y medianas empresas acceder a los sistemas de diseño alternativo, hasta ahora fundamentalmente usados por las grandes empresas.

**Objetivos:** El objetivo principal es reconstruir en computadora la geometría de un objeto. Para lograrlo es necesario alcanzar las siguientes metas:

- Diseñar y construir un sistema propio para la captura de coordenadas espaciales.
- Compensar los errores mecánicos y elaborar algoritmos de cálculo.
- Enlazar los algoritmos con una interfaz flexible dentro de un programa de CAD comercial.

El presente proyecto apoya los trabajos desarrollados por los autores sobre optimización geométrica usando algoritmos de crecimiento biológico [RAM03, RAM04a, RAM04b, RAM05, RAM10], en el desarrollo de un sistema que permita la digitalización de objetos de geometría compleja [LOP06, LOP08, LOP09].

## METODOLOGÍA

El brazo es un mecanismo articulado sin elementos motrices para ser movido y colocado de forma manual, manteniendo el sistema de referencia fijo. Cada articulación tiene acoplado un sensor digital, que codifica el valor angular de la articulación. La punta consta de un palpador recto o probeta, cuyo punto de contacto en la jerga técnica es conocido por TCP (*Tool Center Point*). El cálculo de las coordenadas del TCP incluye no solamente el análisis del mecanismo, sino también las consideraciones de calibración individual de los componentes, así como el de todo el sistema en general. Si el TCP está posicionado en un objeto, las coordenadas del TCP serán las del punto de contacto de la probeta con el objeto. El uso exhaustivo de esta condición permite la captura de puntos a lo largo del objeto, y por lo tanto, de la geometría de éste. La metodología utilizada para la construcción del brazo digitalizador fué:

- Modelo cinemático, construcción y ensamble de los elementos mecánicos.
- Calibración cinemática y de forma.
- Programación de algoritmos para el cálculo utilizando transformaciones geométricas.
- Creación de la interfase de usuario
- Pruebas de medición.

La *calibración cinemática* calibra los parámetros de las funciones de cinemática directa que describen el mecanismo [GUO11, GSO09, SHI02, VRH07]. Se calculan los valores tridimensionales de posición y

orientación asumiendo que cada miembro es perfecto y no se ve afectado por factores tales como deformaciones por fuerza, temperatura, etc. La *calibración de forma* calibra los errores de ensamble y construcción [GAO09, JAW12].

Una vez calibrado, si se coloca el brazo de tal forma que el TCP toque a un objeto en cuestión, por compensación geométrica es posible calcular el valor de coordenadas del punto del objeto que se está tocando. Un sistema electrónico supervisa codificadores angulares de cada grado de libertad. Los valores angulares son los datos de entrada de un algoritmo para el cálculo del TCP, y a través de la transferencia a un ambiente CAD de computadora. Esto convierte al brazo en una máquina de medición.

## MODELO CINEMÁTICO DEL MECANISMO

Sea  $\{L\}$  (ecuación 2) el vector de valores de construcción y  $\{\theta\}$  (ecuación 3) el vector de valores de posición. La ecuación (1a) calcula la traslación para cualquier sistema local de coordenadas, mientras que las ecuaciones (1b, 1c, 1d) calculan las rotaciones X,Y,Z de los ejes locales con respecto al sistema universal.

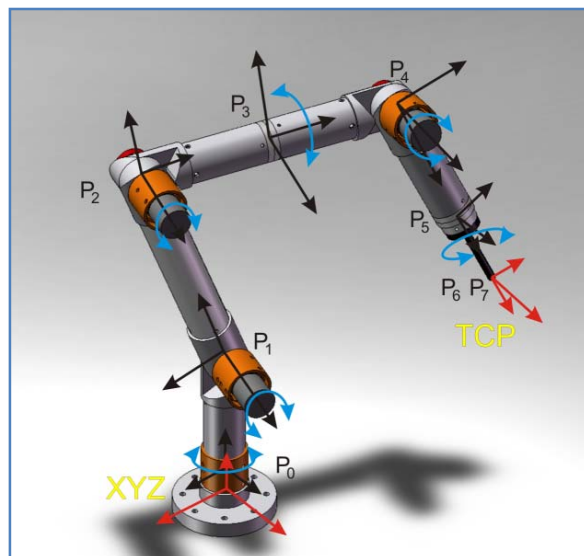


Figura 2.- Ensamble completo del brazo digitalizador utilizando las articulaciones de la figura 4. Se destacan el sistema de referencia XYZ y el punto final del brazo TCP.

$$T(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 1a})$$

$$R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 1b})$$

$$R_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 1c})$$

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 1d})$$

Los valores de distancia entre cada articulación de la cadena son:

$$L^T = (1 \ 4 \ 6.25 \ 3.69 \ 4 \ 4 \ 0.5 \ 0.5) \quad (\text{ec. 2})$$

Los valores angulares están dados por la constante de resolución del codificador angular y el valor numérico del contador de pulsos:

$$\theta_i = \frac{2\pi}{4096} \cdot \text{Encoder}_i \quad (\text{ec. 3})$$

El vector  $\{P\}$  representa los ejes locales de cada articulación. Ver figura 2.

$$\begin{aligned} P_0 &:= T(0, L_0, 0) \cdot R_y(\theta_0) \\ P_1 &:= T(0, L_1, 0) \cdot R_x(\theta_1) \\ P_2 &:= T(0, L_2, 0) \cdot R_x(\theta_2) \\ P_3 &:= T(0, L_3, 0) \cdot R_y(\theta_3) \\ P_4 &:= T(0, L_4, 0) \cdot R_z(\theta_4) \\ P_5 &:= T(0, L_5, 0) \cdot R_y(\theta_5) \\ P_6 &:= T(0, L_6, 0) \\ P_7 &:= T(0, L_7, 0) \end{aligned} \quad (\text{ec. 4})$$

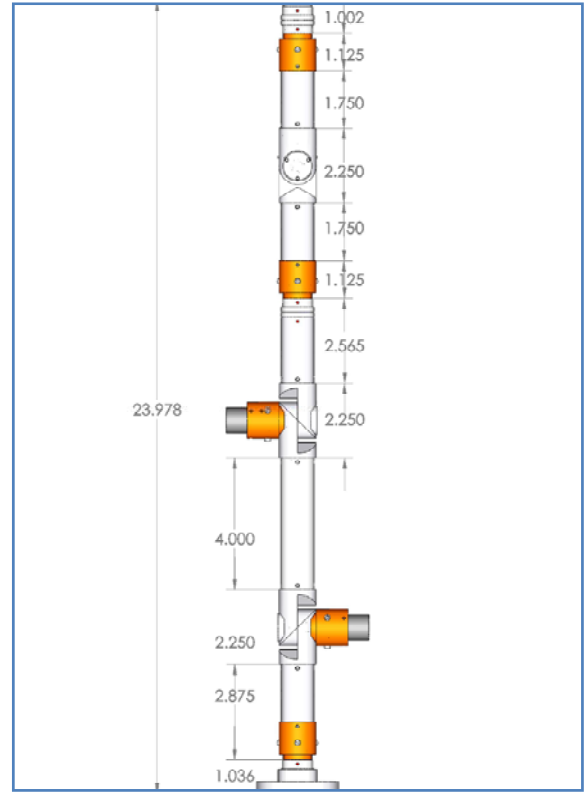
Nótese que los argumentos de la transformación lineal y la posición en la multiplicación matricial de las rotaciones Rx, Ry, Rz identifican la construcción geométrica del mecanismo.

La multiplicación de todas las matrices de transformación mostradas en (ec. 4) representa la ecuación del modelo del mecanismo.

$$P_T := P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \quad (\text{ec. 5})$$

$P_T$  es también una matriz homogénea 3D, por lo que las coordenadas del punto de medición TCP es la columna resultado de la matriz.

$$TCP = P_T^{\langle 3 \rangle} \quad (\text{ec. 6})$$



**Figura 3.-** Dimensiones de construcción para el cálculo del vector L de la ecuación (2). Los valores están dados en milímetros.

## COMPONENTES Y ESTRUCTURA DEL BRAZO DIGITALIZADOR

Las articulaciones del brazo digitalizador son de dos tipos:

- 1) Articulación de codo: con un rango de trabajo de  $300^\circ$ . Figuras 4a y 5a.
- 2) Articulación radial: con un movimiento angular libre  $n\pi$ . Figuras 4b y 5b.

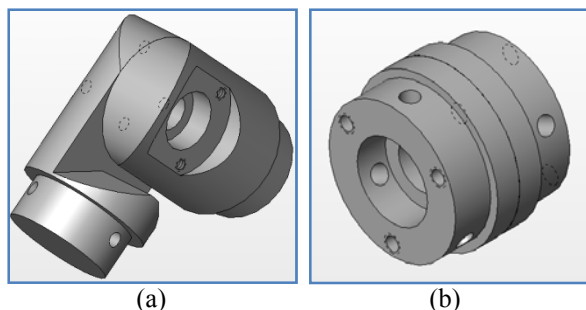
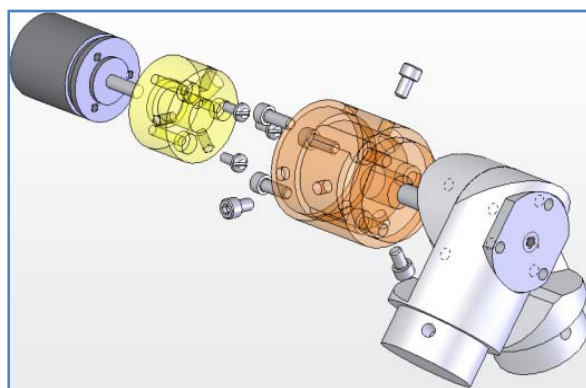
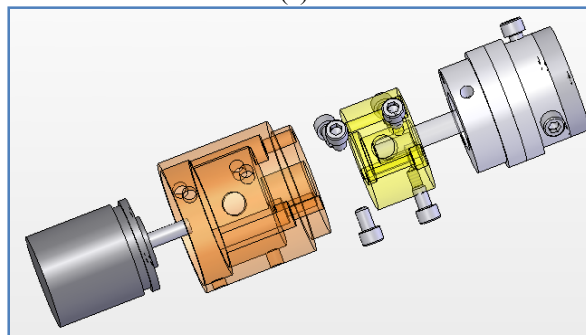


Figura 4.- Tipos de articulaciones de los que se compone el brazo digitalizador (a) articulación tipo codo, y (b) articulación axial.



(a)



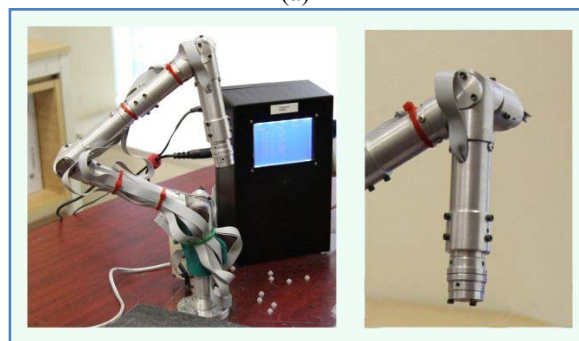
(b)

Figura 5.- Diagrama de ensamblaje del sensor con las articulaciones de la figura 4: (a) articulación tipo codo, y (b) articulación axial.

El ensamblaje completo consta de tres articulaciones de codo y tres de tipo axial, unidas por cuatro cilindros rectos de 2 pulgadas y uno de 4 pulgadas. En el extremo final se acopló un palpador recto.



(a)



(b)

Figura 6.- (a) maquinado en taller de las piezas de las articulaciones de la figura 4 y (b) Ensamble del brazo digitalizador.

## LOS SENSORES DE ARTICULACIÓN Y SU SISTEMA DE SUPERVISIÓN

El sistema 586-drive es un controlador programable en C/C++ basado en un procesador Elan AMD SC520 de 32 Bit a 133 MHz. Este sistema combina un procesador de alto desempeño de la generación 586 con un extenso grupo de características de entrada y salida industriales en una sola tarjeta.

La tarjeta QD8 permite controlar hasta ocho codificadores de cuadratura 63QDL-3-P de 4096 pulsos por revolución. La tarjeta QD8 se interconecta con un controlador (SC520) a través de un bus de datos de 8 bit de alta velocidad. Esto es especialmente importante, pues el reto de mantener todos los valores angulares sin pérdida de información requiere de electrónica de alta velocidad. La tarjeta controladora se muestra en la figura 7, mientras que el acoplamiento mecánico del sensor en la figura 5.





Figura 7.- Sistema 586 drive con la tarjeta QD8 para la administración de los codificadores angulares.

El sistema 586 drive y la tarjeta Qd8 administran los pulsos de los seis codificadores angulares. El usuario coloca manualmente el palpador en la posición que desea capturar. Los valores de los contadores de los codificadores se transfieren por el puerto serie RS232 cuando el usuario presiona el pedal de comunicación. Véase la figura 8.

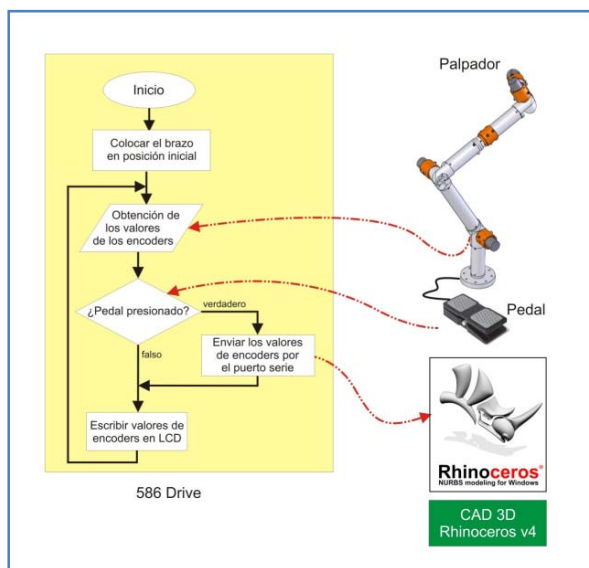


Figura 8.- Sistema de adquisición de puntos para Rhinoceros utilizando un plugin desarrollado exprofeso.

## AMBIENTE CAD Y SU ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

La tarjeta electrónica 586 drive, que controla los codificadores angulares de las articulaciones tiene conexión a una computadora por medio de un puerto RS232.

El programa residente en la computadora que hace uso de los valores angulares es un algoritmo desarrollado para Rhinoceros, un ambiente de CAD programable, que permite la colocación de un punto por cada bloque de información que conforma la posición del brazo en el momento de la medición.

La figura 9 muestra el diagrama a bloques del procesamiento de información. El bloque de transformaciones geométricas es el algoritmo de la implementación de la ecuación 5. La figura 10 muestra el algoritmo ejecutándose en el ambiente de CAD Rhinoceros.

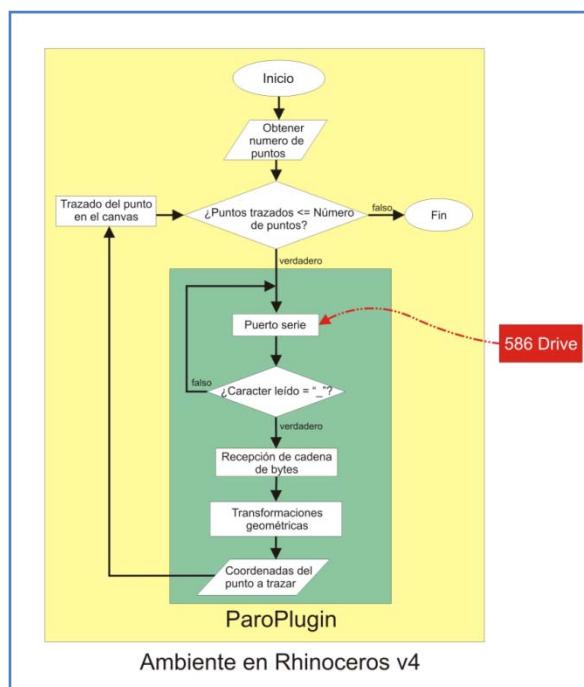


Figura 9.- Diagrama a bloques del algoritmo del plugin para Rhinoceros.

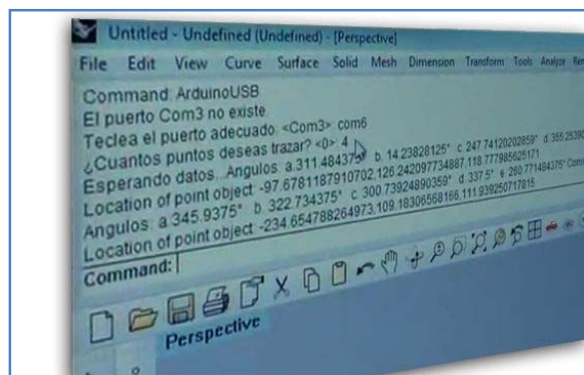


Figura 10.- Plug-In para el programa CAD Rhinoceros recibiendo el estado numérico de los codificadores.

### CALCULO DEL ERROR DE MAQUINADO

Para la calibración de forma fue necesario que el maquinado de las piezas tuviese una desviación de construcción mínima. Esto garantiza que el mecanismo tenga mínimo error con respecto al modelo matemático (ecuación 6). El análisis de desviación se hizo utilizando una máquina de coordenadas en cada pieza maquinada (figura 6a). A continuación se presentan los datos de medición del componente P2 y su comparativo con respecto al archivo de CAD. El número de puntos muestreados para este componente fue de 680329. El rango de los valores extremo del componente es:

- Máx: +0.097 a -0.097 pulg. (2.4638 mm)
- Mín: +0.007 a -0.007 pulg. (2.4638 mm)

Los valores numéricos de las desviaciones se presentan en las tablas I (porcentual) y II (pulgadas).

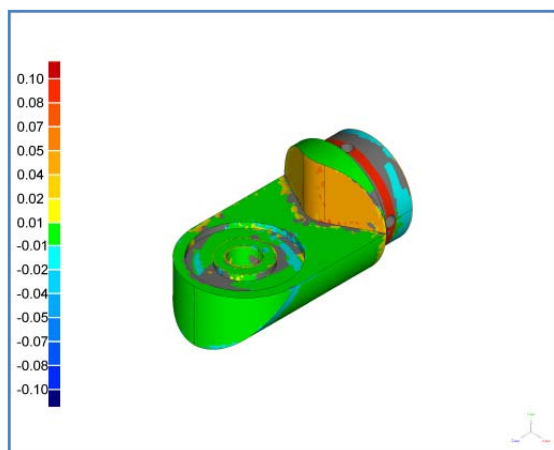


Figura 11.- Diagrama de colores de las desviaciones de maquinado con respecto a su diseño en CAD de un componente de articulación (en pulgadas).

Tabla I.- Porcentaje de desviaciones.			
>=Min (pulg.)	<Max (pulg.)	# Puntos	%
-0.097	-0.082	957	0.141
-0.082	-0.067	4378	0.644
-0.067	-0.052	6078	0.893
-0.052	-0.037	7725	1.135
-0.037	-0.022	18327	2.694
-0.022	-0.007	47460	6.976
-0.007	+0.007	445456	65.477
+0.007	+0.022	25009	3.676
+0.022	+0.037	29410	4.323
+0.037	+0.052	52843	7.767
+0.052	+0.067	6692	0.984
+0.067	+0.082	7562	1.112
+0.082	+0.097	28432	4.179

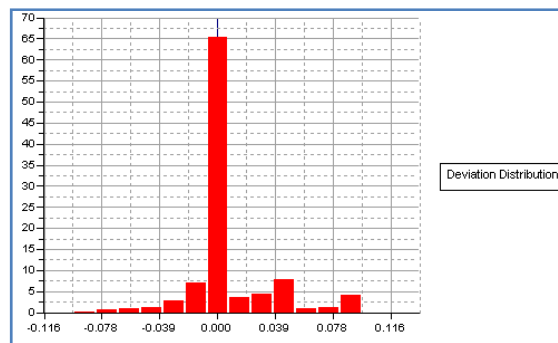


Figura 12.- Histograma de porcentajes de las desviaciones estándar de la tabla I.

Tabla II.- Desviaciones estándar.		
Distribución (+/-)	# Puntos	%
-6 * Std Dev	0	0.000
-5 * Std Dev	0	0.000
-4 * Std Dev	1324	0.195
-3 * Std Dev	9273	1.363
-2 * Std Dev	17279	2.540
-1 * Std Dev	300053	44.104
1 * Std Dev	236107	34.705
2 * Std Dev	75303	11.069
3 * Std Dev	9834	1.445
4 * Std Dev	31156	4.580
5 * Std Dev	0	0.000
6 * Std Dev	0	0.000

La figura 11 muestra una fabricación aceptable en la zona en donde opera la articulación con desviaciones no mayores a 0.01 pulgadas. La desviación de maquinado máxima se presenta en la sujeción del componente, y no presentando excentricidad, es irrelevante para efectos prácticos. Los histogramas de las figuras 12 y 13 permiten concluir que el componente tiene una geometría fiel al diseño: el 65% de los puntos medidos tienen una desviación máxima de 0.007 pulgadas (0.1778 mm), y éstas no ocurren en zonas críticas de funcionalidad.

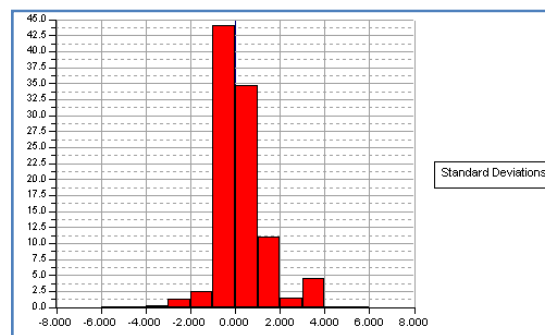


Figura 13.- Histograma de desviaciones estándar de la tabla II.

## EXPERIMENTACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL ERROR DEL MECANISMO

Para la evaluación preliminar se utilizó un bloque patrón de mármol de calibración certificada. Se muestrearon puntos a lo largo de la superficie y se evaluó la nube de puntos arrojada por el brazo digitalizador utilizando el bloque patrón como un plano ideal de referencia. Ver [LI09, MAZ12].

Las coordenadas medidas con el brazo fueron ajustadas a un plano utilizando mínimos cuadrados (ecuaciones 7 y 8).

Haciendo ajustes de mínimos cuadrados para el plano:

$$MA := \begin{bmatrix} \sum_n (x_n)^2 & \sum_n (x_n \cdot y_n) & \sum_n x_n \\ \sum_n (x_n \cdot y_n) & \sum_n (y_n)^2 & \sum_n y_n \\ \sum_n x_n & \sum_n y_n & \max \end{bmatrix} \quad (\text{ec. 7})$$

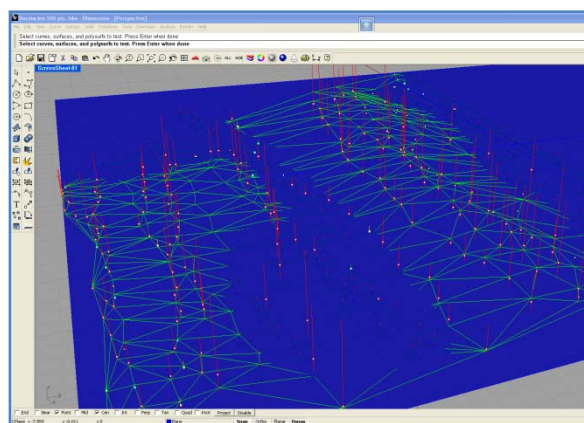
$$MB := \begin{bmatrix} \sum_n (x_n \cdot z_n) & \sum_n (y_n \cdot z_n) & \sum_n z_n \\ \sum_n x_n & \sum_n y_n & \max \end{bmatrix} \quad (\text{ec. 8})$$

Resolviendo  $X = MB * MA^{-1}$

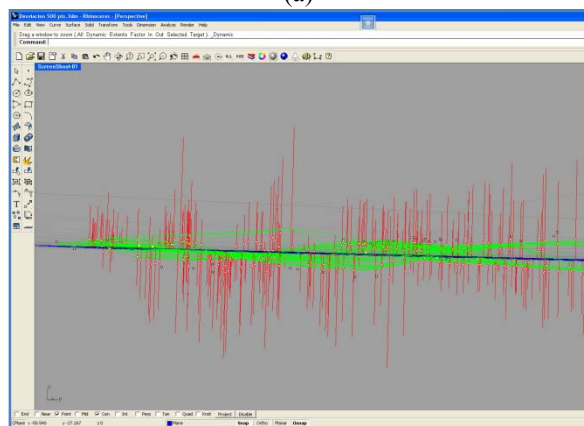
Se encuentra el plano de ajuste para la nube de puntos. Los valores de desviación de la nube de puntos con respecto a este plano se muestran en la tabla III. Dichos valores son los valores de error del brazo digitalizador.

<b>Tabla III.-</b> Valores (mm) de desviación al plano de ajuste	
Número de puntos	471
Distancia promedio	0.44196
Distancia mediana	0.40036
Desviación estándar	0.27343
Distancia de ajuste máx. admisible	1
Distancia de ajuste min. admisible	0

En la figura 14a y 14b se muestran en amarillo los puntos medidos del experimento, en verde la interconexión de éstos como malla triangular, en azul el plano de ajuste resultado del ajuste a mínimos cuadrados y en rojo, escaladas visible, las desviaciones de cada punto a dicho plano.



(a)



(b)

Figura 14.- Tanto en (a) como en (b) se muestran: puntos medidos, malla triangular, plano de ajuste y desviaciones al plano.

Videos del proceso de medición del cuadro experimental puede verse en las siguientes direcciones:

<http://www.youtube.com/watch?v=GxP-jEBFRbo>  
<http://www.youtube.com/watch?v=gXYUSzoPSHg>

Se tomaron medidas al bloque patrón encontrando dimensiones de 205.38x300.14mm. La diferencia de las mediciones es de 2.18mm y -4.66mm respectivamente, lo cual arroja un el error de 1.07% y -1.53% respectivamente. Ver figura 15.

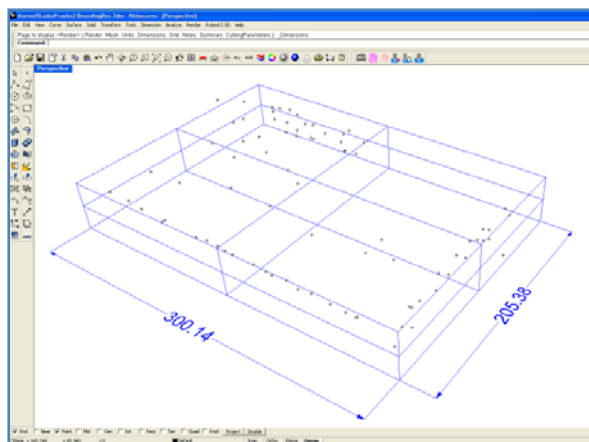
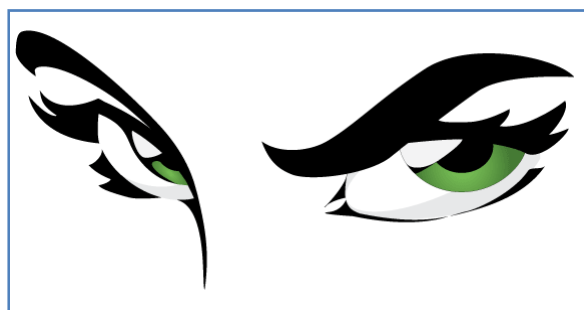


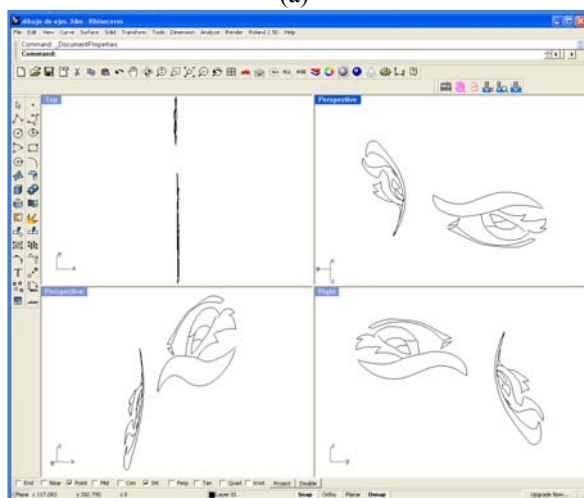
Figura 15.- Mediciones en CAD 3D Rhinoceros tomadas con el brazo digitalizador al bloque patrón de mármol. Las cotas muestran las dimensiones medidas.

### EXPERIMENTACION PRELIMINAR

Para comprobar el efecto visual del grado de precisión del brazo digitalizador se imprimió en papel un dibujo hecho por computadora (con licencia de uso libre), para después ser reconstruido utilizando el brazo. El resultado se muestra en la figura 16.



(a)



(b)

Figura 16.- Prueba preliminar de aplicación del brazo: (a) dibujo hecho por computadora [http://vector4free.com], y (b) reconstrucción CAD 3D Rhinoceros en R3 utilizando el brazo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se diseñó y fabricó un brazo digitalizador integrando algoritmos de programación con componentes electrónicos asequibles y piezas maquinadas en taller. Se obtuvieron las coordenadas de la geometría para ser utilizadas por programas computacionales comerciales.

Se demostró la factibilidad de la fabricación de un brazo digitalizador con aplicaciones de medición e ingeniería inversa.

Se sometió el brazo a un cuadro experimental con un patrón plano que permitió hacer las primeras calibraciones.

- **Valor de tolerancia (T).**- Diferencia entre los valores mayor y menor considerados como válidos en el plano:  $T=3.648\text{mm}$ .
- **Valor de incertidumbre (I).**- La dispersión de la distancia de los valores medidos con respecto al plano de mármol:  $I=0.27343\text{mm}$ .

Los porcentajes de error en las mediciones al patrón de calibración fueron de 1.07% y -1.53%, lo cual es un desempeño preliminar bastante bueno.

Los valores de los resultados arrojados en este trabajo permiten hacer las siguientes consideraciones para trabajos a futuro:

- Cálculo del factor de corrección para la compensación del error.
- Modificación del algoritmo de interfase de CAD para la compensación del error sistemático.
- Reevaluación de la mejora para dar mediciones mejoradas a un valor verdadero.
- Clasificación del grado de exactitud según normas.
- Inserción del instrumento en la cadena de trazabilidad.
- Verificación (según 2.17 de la ISO 8402/93).
- Hacer un cuadro de contrastación para diferentes aplicaciones.

Se espera, sin embargo, que el prototipo pueda ser utilizado por personal no especializado para la captura de geometrías complejas, como es el caso de modelos a escala, geometrías de origen biológico, y componentes industriales con requisitos de baja precisión.





Figura 13.- Fotografía del brazo digitalizador con el sistema de control de codificadores angulares y el bloque patrón de calibración.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se detalla el proceso de diseño y la fabricación de un brazo digitalizador para ser utilizado como máquina de coordenadas en la captura de objetos 3D. Se presentó el proceso de diseño y construcción de las partes mecánicas, interconexiones eléctricas y algoritmos de programación.

Se hicieron pruebas para calibrar y compensar las diferencias de diseño con las de fabricación. Para ello se modeló la cadena cinemática y con experimentos se calculó el valor de tolerancia y de la incertidumbre del dispositivo.

Los experimentos llevados a cabo con el dispositivo permiten inferir su viabilidad en aplicaciones dedicadas a la captura de objetos de geometría compleja, tal como pueden ser objetos artísticos, antropológicos y/o biológicos [REZ08].

Se espera que los resultados obtenidos puedan ser utilizados en la cadena de procesos para la producción de taller, tales como moldes o ingeniería inversa.

### RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado por miembros del cuerpo académico *Sistemas Integrados de Manufactura* como parte del proyecto de investigación 103.5-11-6844 UANL-CA-166 patrocinado por SEP-PROMEP. Se utilizó el equipo de las instalaciones del Departamento de Mecatrónica de la FIME-UANL:

- Sistema 586-drive: controlador programable en C/C++ basado en un procesador Elan AMD SC520 de 32 Bit a 133 MHz.
- Tarjeta QD8 permite controlar ocho encoder de cuadratura. La tarjeta QD8 se interconecta al sistema 586 a través de un bus de datos de alta velocidad.
- Rhinoceros v4 dotado del módulo RhinoVB.NET SDK.
- MathCAD R14 para cálculos
- SolidWorks v2007
- Microsoft Visual Studio. .NET Framework 2.0. VB.NET Express 2010
- Plano de mármol de calibración marca Mitutoyo "Graplate" grado 8, de 8x12 pulgadas (203.2x304.8mm), serie 548-0 con exactitud de 0.002 pulgadas.
- Impresora 3D de la compañía ZCorp, modelo Spectrum Z510 con capacidad de construcción de 2 capas por minuto y un volumen de trabajo de 254 x 356 x 203 mm, con resolución de 600 x 540 dpi.
- Máquina de coordenadas marca FARO modelo "Platinum Arm P0805" de 19,200 mediciones/segundo, con una exactitud de 50µm (0.002 pulgadas) y repetibilidad  $\pm 50\mu\text{m}$ ,  $2\sigma$  ( $\pm 0.002$  pulgadas).
- Licencia de software para el tratamiento de puntos Geomagic Studio/Qualify v8.

Los autores agradecen al M:C. Ing. Leonel Montelongo por su desinteresada donación bibliográfica, de componentes y recursos para la construcción del sistema electrónico del brazo digitalizador; también a los estudiantes de la carrera de Ingeniero en Mecatrónica: Guillermo Loera González, Idalia Urbano Alemán, Jaime Aparicio Esquivel, José Alberto Rodríguez Chávez, Martha Angélica Villasana de la Garza.

## REFERENCIAS

- [APU06] Nicola D'Apuzzo. "Overview of 3D surface digitization technologies in Europe". Three-Dimensional Image Capture and Applications VI, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose California, USA, 2006.
- [GAO09] G. Gao, W. Wang, K. Lin, Z. Chen. "Structural Parameter Identification for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines". International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. p128-131. Computer Society IEEE 2009.
- [GSO09] G. Gao, W. Wang, K. Lin, Z. Chen. "Kinematic Calibration for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Base on Particle Swarm Optimization". Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE 2009.
- [GUO11] J. Guo, Y. Wang. "Study on Calibration Technology of Portable Coordinate Measuring Machines". International Conference on Electronics and Optoelectronics. V4 170-173. IEEE 2011.
- [HU12] Yang Hu, Qingping Yang, Xizhi Sun. "Design, Implementation, and Testing of Advanced Virtual Coordinate-Measuring Machines". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, NO. 5, May 2012.
- [IUL10] L. Iuliano, P. Minetola and A. Salmi. "Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers". IOP Publishing. Measurement Science and Technology, 21 105102 (13pp, 2010).
- [JAW12] H.P. Jawale, H.T. Thorat. "Investigation of Positional Error in Two Degree of Freedom Mechanism With Joint Clearance". Journal of Mechanisms and Robotics. Transactions of the ASME, vol. 4. February 2012.
- [LEE05] S. J. Lee and D. Y. Chang. "Laser scanning probe with multiple detectors used for sculptured surface digitization in reverse engineering". 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Journal of Physics: Conference Series 13 155-158. Institute of Physics Publishing, 2005.
- [LI03] Y. F. Li and Z. G. Liu. "Method for determining the probing points for efficient measurement and reconstruction of freeform surfaces". Measurement Science and Technology. 14 p1280-1288. Institute Of Physics Publishing 2003.
- [LI09] Z. Li, Y. Wang. "Research on 3D Reconstruction Procedure of Marked Points for Large Workpiece Measurement". 2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security. Computer Society IEEE 2009.
- [LOP06] E. López, F. Ramírez, I. Romero, J. de la Garza, J.L. Castillo. "Diseño de un instrumento para la captura de geometrías 3D con aplicación en la manufactura de productos". Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Vol. 2 No. 3, Año 5 (2006) p. 101-110 ISSN1665-7381.
- [LOP08] E. López, I. Márquez, D. Franco, F. Ramírez. "Elaboración de bustos por medio de digitalización 3D y prototipos rápidos". XIV Congreso Internacional Anual SOMIM p.836-846, sept. 2008. ISBN 968-9173-01-4.
- [LOP09] E. López, F. Ramírez, A. Ávila. "Digitalización 3D como herramienta en la manufactura de calzado deportivo". XV Congreso Internacional Anual SOMIM p.137-146, sept. 2009. ISBN 968-9173-01-4.
- [MAZ12] F. Mazzini, S. Dubowsky. "Experimental Validation of the Tactile Exploration by a Manipulator With Joint Backlash". Journal of Mechanisms and Robotics, ASME. vol. 4. February 2012.
- [RAM03] Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. "Reducción de la concentración de esfuerzos para piezas de fundición por medio del método de elementos finitos utilizando algoritmos de crecimiento biológico". IX Congreso Anual SOMIM 2003 vol. VI, pág. 25, Sept. 2003.
- [RAM04a] Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. "Diseño óptimo de elementos mecánicos usando algoritmos de crecimiento biológico". Revista Ingenierías vol. VII, no. 22, 2004.
- [RAM04b] Ramírez, F., López, E. Ocañas, J. "Optimización geométrica con criterio de

- crecimiento biológico para la reducción de la concentración de esfuerzos en uniones”. X Congreso Anual SOMIM 2004 Sept. 2004.
- [RAM05] Ramírez, F., López, E. Romero, I. “*Optimización geométrica con criterio de crecimiento biológico para la reducción de la concentración de esfuerzos en placas con perforaciones transversales*”. XI Congreso Internacional Anual SOMIM, Sept. 2005.
- [RAM10] E. López, F. Ramírez, I. Márquez, J. de la Garza, A. Castillo. “*Relación de la geometría de elementos mecánicos con el cambio de forma en la naturaleza como criterio de diseño*”. XVI Congreso Internacional Anual SOMIM, Sept. 2010. ISBN 968-9173-01-4
- [REZ08] J. Reznicek, K. Pavelka. “*New low-cost 3d scanning techniques for cultural heritage documentation*”. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.
- [SHI02] K. Shimojima, R. Furutani, K. Takamasn and K. Araki. “*The Estimation Method of Uncertainty of Articulated Coordinate Measuring Machine*”. IEEE ICIT’02. Bangkok, THAILAND 2002.
- [VRH07] M. Vrhovec, M. Munih. “*Improvement of Coordinate Measuring Arm Accuracy*”. Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA, USA, Oct 29-Nov 2, 2007.
- [WIN06] S. Winkelbach, S. Molkenstruck and F.Wahl. “*Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach*”. K. Franke et al. Editors. DAGM, LNCS 4174, pp. 718–728. Springer Berlin Heidelberg 2006.
- [WU11] Y. Wu, H. Wang, Z. Li. “*Quotient Kinematics Machines: Concept, Analysis, and Synthesis*”. Journal of Mechanisms and Robotics, ASME. vol. 3. May 2011.