

Propuesta de un Subsistema de Extensometría Para la Integración de un Banco Experimental de Robótica Flexible

Investigación

M.C. Mario Salvador Esparza González, Dr. Carlos Humberto Saucedo Zarate, Dr. Carlos Sánchez López, M.C. Luis Antonio Castañeda Ramos

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Ojocaliente FOVISSSTE, Aguascalientes, Ags. C.P. 20256, Tel: 01 (449) 9105002 ext. 184, Fax: 01 (449) 9700423 msespa@ieee.org

Resumen

En este artículo se aborda la problemática de la instrumentación extensométrica como elemento fundamental de un Banco Experimental de Robótica Flexible. El diseño de este subsistema permite realizar lecturas de hasta 8 galgas extensiométricas en configuración de un cuarto en puente de Wheatstone, y está destinado a la valoración del estado de esfuerzo/deformación en los elementos mecánicos de prototipos robóticos tanto rígidos, como explícitamente flexibles o esbeltos. El subsistema es modular e independiente y está integrado a un bastidor mecánico donde se realiza el montaje para la ejecución de pruebas de desempeño de los prototipos de robots esbeltos. El sistema se probó y validó mediante una serie de pruebas realizadas a un eslabón flexible mediante un flexor de línea Vishay™, donde se alcanzó resolución de $0.224\mu\epsilon$ en la flexión pura de un eslabón de 319 mm de longitud fabricado en aluminio, deformándose incrementalmente hasta un máximo de 12.065 mm de flecha; los resultados experimentales y los predichos por las ecuaciones de la teoría del medio continuo, muestran que el sistema de medición es confiable y corresponde a lo establecido por la mecánica del medio continuo para estas geometrías y materiales.

Palabras clave: Extensometría, micro deformación, brazo robótico esbelto, puente de Wheatstone, resistencia.

Abstract

This paper approaches the problem of strain gauge instrumentation as a fundamental element of a Experimental Setup for Flexible Robots. The design of this subsystem allows readings up to 8 strain gauges, in a quarter configuration of Wheatstone bridge, and is destined to the valuation of condition of stress / strain in rigid or mechanical flexible robotic prototypes. The subsystem is modular and independent and is integrated into a mechanical frame assembly which was made to execute performance tests of prototype robots slender.

The system was tested and validated with a series of measurements performed on a flexible link in a flexor by Vishay™, where a $1.6\mu\epsilon$ resolution was reached in pure bending by means of an aluminum link of 319 mm length, incrementally deforming up maximum of 12.065 mm of resultant flexion, the experimental results and those predicted by equations the theory of continuous media, show that the measurement system is reliable and corresponds to the provisions of the continuous mechanics for these geometries and materials.

Key words: Extensometry, microdeformation, slender robotic arm, Wheatstone bridge, resistance.

Introducción

Los robots industriales están contruidos generalmente por brazos articulados para desarrollar una tarea programada mediante un PLC, computadora o algún otro dispositivo. La cadena cinemática abierta es una estructura común y basa sus grados de libertad en función de las articulaciones unidas mediante un elemento rígido planar o tubular, en los últimos años se ha trabajado con una modificación en el eslabón con la finalidad de hacerlos más ligeros y de mayor alcance [1] calificándose como “Robots flexibles” donde el principal problema para posicionarlos es el control del sistema debido a la flexión que presentan los eslabones durante el movimiento. Algunas de las soluciones propuestas se basan en la adecuación del sistema de control mediante diferentes técnicas como las desarrolladas en [2,3] que utilizan un método no lineal adaptativo o un controlador resonante [4]. En [5] utilizan un sistema de retroalimentación con galgas extensiométricas y una técnica de control directa. En [6-7] la retroalimentación es empleando galgas extensiométricas para posicionar el robot; estos problemas no se presentan en un robot rígido [8]. En [9] utilizan la extensometría para validar su propuesta sobre la medición de deformación en materiales por lo que se ha seleccionado esta técnica. Sistemas desarrollados previamente [9-12] cuentan con calibración analógica además; no cuentan el

monitoreo de temperatura, en ese caso la duración de los disparos de laser y la medición de extensometría era prácticamente instantánea e intermitente de manera que los cambios de temperatura eran mínimos en las galgas y eran rápidamente disipadas por el material de aluminio del eslabón que actuaba como un disipador.

En esta nueva aplicación, la temperatura requiere ser monitoreada con el fin de garantizar que no rebase un rango que altere las mediciones, ya que la extensometría se utilizará con fines de experimentación como señal de retroalimentación en forma continua.

El objetivo de la investigación es desarrollar un sistema de medición de deformación en eslabones flexibles con un sistema de calibración por software que incluya la compensación por temperatura durante las pruebas.

El proyecto se desarrolló en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes como parte del autoequipamiento del cuerpo académico en Automatización y Control de sistemas con el objetivo de desarrollar investigación en el área de la robótica flexible; en este caso la evaluación de microdeformaciones en brazos de robot flexibles. El proyecto se desarrolló entre junio de 2012 y junio de 2013, el material y equipo fue adquirido previamente en proyecto financiado por PROMEP en el programa de fortalecimiento de cuerpos académicos convocatoria 2011.

Fundamentos teóricos

Una galga extensiométrica es un sensor basado en el principio descubierto por Lord Kelvin en 1856 donde un material conductor de longitud l , sección transversal A y resistividad ρ tiene una resistencia eléctrica R definida por:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (1)$$

Si el elemento conductor es sometido a un esfuerzo modificando su longitud o sección transversal se produce un cambio en su resistencia en función de:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (2)$$

De la ecuación (2) se observa que la longitud influye positivamente incrementando la resistencia del material, un incremento de área o sección transversal reduce la resistencia del material. Un incremento en la resistividad del material representa un incremento en la resistencia. El valor de resistividad es función de la temperatura por lo que es necesario compensarla cuando se realizan mediciones con este tipo de dispositivos. La variación puede alcanzar hasta un valor de $50 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. [13]

La medición de cambios de resistencia pequeña se realiza con un puente de Wheatstone que permite transformar un cambio de resistencia eléctrica en una variación de tensión diferencial; el arreglo de puente completo consta de cuatro resistencias y se muestra en la figura 1, la resistencia R_x representa la resistencia de la galga extensiométrica. La resistencia R_1 es una resistencia de ajuste para establecer una diferencia de potencial V_d igual a cero en condiciones iniciales sin deformación y las resistencias R_2 y R_3 son resistencias de referencia. Si estas últimas son iguales y de valor el proceso de calibración del sistema de medición se realiza empleando la resistencia variable que se ajusta al valor de la galga extensiométrica hasta que el voltaje diferencial es igual a 0. Si el material en el que se encuentra instalada la galga sufre una deformación con un cambio igual a el voltaje diferencial se determina por:

$$V_d = \frac{-\Delta R_x R}{(R_1 + R)(R_1 + R + \Delta R_x)} V_e \quad (3)$$

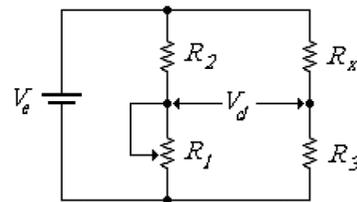


Figura 1. Puente de Wheatstone.

Donde V_e es el voltaje de excitación del circuito.

El rango de medición es de $\pm 2000 \mu\epsilon$, con un V_d máximo de 2.5V el sistema tiene una resolución de:

$$\text{Deformación} = 1600 \mu\epsilon/V$$

Si el sistema de adquisición de datos es de 24 BIT tenemos una resolución posible de:

$$\text{Resolución} = 0.000095 \mu\epsilon/\text{BIT}$$

Materiales y métodos

El sistema de adquisición de datos se basa en tecnología de National Instrument donde se consideró la velocidad de respuesta, capacidad de configuración, versatilidad de módulos y del sistema.

El sistema consta (Ver figura 2) de un Chasis (1) con capacidad de 8 módulos "cDAQ-9178". El primer módulo de entrada de "termopar" de 4 canales "NI-9211" (2) para monitoreo de la temperatura con 4 canales de 24-Bit de resolución ajustado en el rango de 0 a 50°C teniendo una resolución de $3 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$ y un termopar tipo J. Dos módulos "NI9237" (3) con 4 canales de entrada para conexión de puente de Wheatstone en configuración

de ¼ de puente o puente completo; la configuración de ¼ se emplea a través de una resistencia patrón programable modelo NI9945 de 350 ohms. La galga extensométrica empleada en el desarrollo del banco es de la marca vishay tipo roseta rectangular de propósito general 45°: CEA-13-250UR-350. Todo fue instalado en un gabinete de monitoreo y control que incluye las protecciones eléctricas (4) considerando espacio para trabajo futuro en el análisis de vibraciones y control de motores de pasos para programar pruebas automatizadas en una cadena cinemática. Se incluyen dos fuentes de alimentación “P70360” (5), con 4 clemas de conexión con tornillo para conductor neutro (6) y 4 clemas de conexión con tornillo para conductor de puesta a tierra (7). 4 interruptores de un polo un tiro para encender los módulos de forma independiente (8).

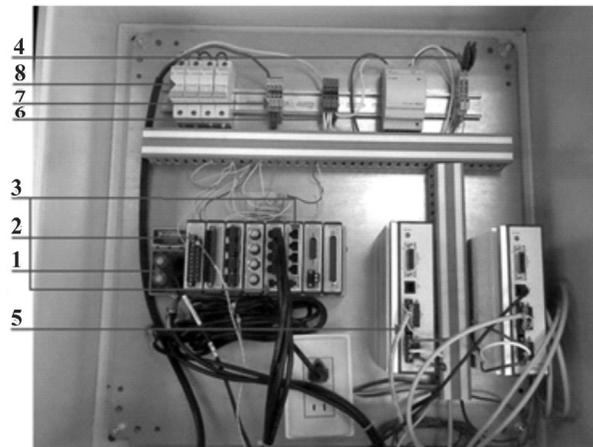


Figura 2.- Tablero de instrumentación y control.

Las pruebas se desarrollaron sobre un eslabón de aluminio de 2.5x31.9x0.5 cm, en flexor de línea Visay para ejercer la fuerza de deformación, el dispositivo cuenta con un micrómetro de precisión de una milésima de pulgada y alcance de una pulgada para producir y medir la distancia de flexión del eslabón. La figura 3 muestra el ensamble del sistema para deformación del eslabón, el punto de flexión se encuentra a 280mm del punto de apoyo; el eslabón es sujetado a 15mm del extremo izquierdo. La galga extensiométrica se montó sobre el eslabón a una distancia de 30mm respecto al mismo extremo, cuenta con 3 celdas, una central alineada con el eje geométrico principal del eslabón y dos a +45° y -45° (ver figura 4). El sistema fue calibrado digitalmente, que es una de las ventajas de la arquitectura seleccionada. El procedimiento se desarrollo de forma manual en 2 etapas para analizar la linealidad y resolución del sistema, en la primera etapa se tomaron lecturas cada 0.635mm entre 0 y 12.065mm. En la segunda etapa se tomaron lecturas cada 0.0254mm entre

0 y 1.270mm de flexión del eslabón. Se agregó un filtro digital Butterword de orden 7 pasa bajas con frecuencia de corte de 10Hz para eliminar el ruido eléctrico. En cada lectura se tomaron mil muestras, presentando el valor medio.

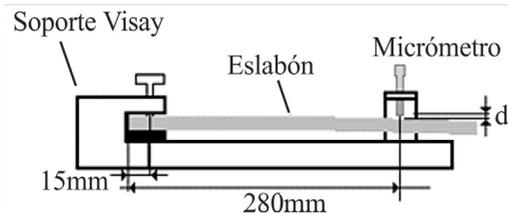


Figura 3.- Distancias de medición y sujeción de eslabón en prueba.

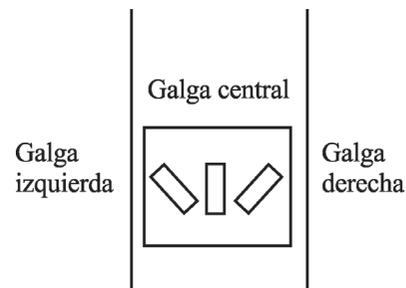


Figura 4.- Acomodo de la galga extensométrica en eslabón.

Tabla 1. Lecturas de 0 a 12.065mm

Distancia d (mm)	Deformación de galga ($\mu\epsilon$)		
	Izquierda	Central	Derecha
-	- 0.164	0.299	- 0.080
0.635	26.500	95.300	15.400
1.270	53.100	190.750	30.800
1.905	79.000	284.526	46.000
2.540	104.380	376.227	61.700
3.175	130.950	474.497	78.000
3.810	156.840	570.880	94.500
4.445	183.120	667.110	110.470
5.080	213.291	764.500	124.074
5.715	236.581	859.616	142.233
6.350	262.757	954.670	157.795
6.985	288.974	1,051.053	173.494
7.620	316.062	1,147.698	189.404
8.255	356.663	1,243.737	196.271
8.890	376.856	1,337.644	215.278
9.525	395.986	1,434.745	235.912
10.160	431.555	1,531.224	245.822
10.795	449.409	1,627.035	266.841
11.430	476.785	1,724.477	282.508
12.065	503.385	1,820.308	298.214

Tabla 2. Lecturas de 0 a 1.27mm

Distancia d (mm)	Deformación de galga ($\mu\epsilon$)		
	Izquierda	Central	Derecha
-	0.332	- 2.160	0.787
0.025	0.170	1.729	0.639
0.051	0.394	3.919	0.863
0.076	0.841	6.957	- 0.848
0.102	2.344	11.328	- 0.277
0.127	3.037	15.275	- 0.016
0.152	3.538	19.033	0.182
0.178	4.628	22.801	0.571
0.203	5.742	26.759	0.821
0.229	6.576	30.919	1.280
0.254	8.001	35.321	1.702
0.279	8.675	39.308	1.952
0.305	9.730	43.810	2.444
0.330	10.651	47.492	4.847
0.356	11.710	51.529	3.332
0.381	12.847	55.943	3.592
0.406	13.602	59.783	4.003
0.432	14.681	33.092	4.320
0.457	15.778	67.354	4.901
0.483	16.568	71.334	5.232
0.508	17.503	74.981	5.597
0.533	18.302	78.658	5.920
0.559	19.235	82.256	6.197
0.584	20.288	85.690	6.686
0.610	21.259	89.673	7.109
0.635	22.217	93.745	7.541
0.660	23.148	97.252	7.895
0.686	24.132	101.098	8.299
0.711	24.508	104.065	8.462
0.737	25.995	108.894	9.002
0.762	26.684	112.738	9.439
0.787	28.221	116.967	10.024
0.813	28.384	120.078	10.277
0.838	29.771	124.627	10.667
0.864	31.325	129.277	11.255
0.889	31.812	132.612	11.391
0.914	32.919	137.356	12.234
0.940	34.382	141.291	12.603
0.965	35.210	144.840	12.987
0.991	35.986	148.527	13.348
1.016	36.323	153.000	13.800
1.041	37.635	157.433	14.523
1.067	39.137	160.874	14.706
1.092	40.069	164.973	15.103
1.118	40.623	167.980	15.408
1.143	42.156	172.274	15.952
1.168	42.713	175.357	16.298
1.194	43.736	179.433	16.660
1.219	44.747	182.774	17.172
1.245	45.609	186.576	17.389
1.270	45.939	189.070	17.604

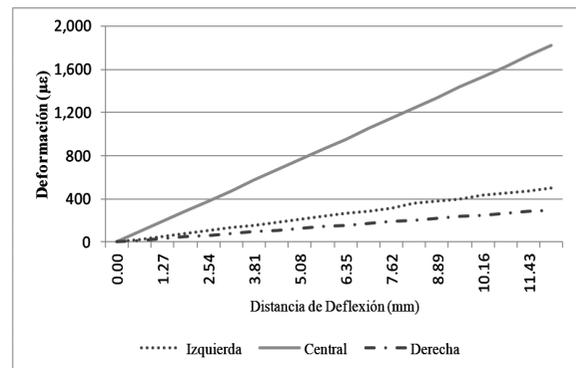


Figura 5. Deformación de eslabón flexible. (Avance de 0.635mm)

Resultados y discusión

El sistema construido con el equipo seleccionado se calibra la resistencia R_f por software. En el proceso de calibración o puesta a cero se alcanzó el valor de $-0.080\mu\epsilon$ en la primera prueba y un máximo de $-2,160\mu\epsilon$ durante la segunda prueba. En cada medición se toma la lectura de la temperatura y se realiza una compensación de 0.3% por $^{\circ}\text{C}$ diferente a 20° lo cual no es considerado en [10-12].

En la primera prueba se obtienen las mediciones mostradas en la tabla 1. Entre 0 mm y 12.065 mm de flexión en el eslabón. La figura 5 muestra gráficamente los resultados comprobando que el material presenta una deformación lineal. Las galgas testigo (Izquierda y derecha) muestran un esfuerzo de torsión que representa en la prueba final una diferencia $201\mu\epsilon$.

Con la finalidad de evaluar la sensibilidad del sistema se presenta una segunda prueba donde se disminuye el paso de las deflexiones en el eslabón a un valor de 0.025mm; el cambio mínimo registrado es de $0.224\mu\epsilon$ inferior a $1\mu\epsilon$.

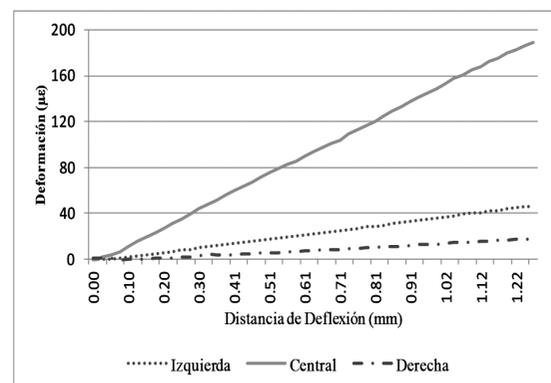


Figura 6.- Graficas de resultados ante cambios finos (avance de 0.025mm)

La segunda prueba se llevó a cabo entre 0 mm y 1.27mm de flexión en el eslabón. La lectura máxima de $189.07\mu\epsilon$, comparando esta con la tercer lectura de la primer prueba que corresponde a la misma distancia se tiene una diferencia de $1.68\mu\epsilon$, lo que representa una variación del 0.88% respecto a la primera prueba.

La figura 6 muestra gráficamente los resultados representando una ampliación de la primera parte de la gráfica mostrada en la figura 5.

Conclusiones

El sistema desarrollado permite medir con una resolución de hasta $0.000095\mu\epsilon$ en una escala de $\pm 2000\mu\epsilon$ en el eslabón de prueba; con el avance aplicado el cambio más pequeño es de $0.224\mu\epsilon$. Se verifica que la deformación en un eslabón de aluminio es lineal dentro del límite elástico de acuerdo con la teoría del medio continuo.

La calibración por software permitió valores de puesta a cero suficientemente pequeños del orden de $-0.080\mu\epsilon$ (Tabla 1, galga derecha), lo que permite contrastar con simulaciones MEF con una precisión aceptable.

En esta nueva aplicación en robótica flexible la temperatura puede ser monitoreada conjuntamente con las señales de extensometría con cambios de $3\mu\text{C}$, dando la opción de compensar cambios de temperatura en experimentos bajo control en aplicaciones con retroalimentación para el control de elementos flexibles.

El sistema Vishay utilizado es capaz de medir en deflexiones incrementales con $d=0.025\text{mm}$ por diseño propio, y para vigas cortas de 30 mm, el sistema puede aplicarse para eslabones de hasta 1m de longitud en flexores diseñados para este fin [12]. El sistema permite el procesamiento de forma simultánea, de manera que se pueden obtener datos de hasta 8 puntos del modelo en estudio, estableciendo con mayor definición el estado de esfuerzo deformación al caracterizar el desempeño de los elementos mecánicos eslabonados.

Referencias

- [1] Ullero A., (2007), *Robótica Manipuladores y Robots Móviles*. Alfaomega-Marcombo México.
- [2] Das A., y Singh S.N., (1993), "Nonlinear adaptive control and linear stabilization of an elastic arm", *Int. Journal of Robotics and Automation*. Vol. #5, No. 3, p. 115-123.
- [3] Feliu J.J., Feliu V., y Cerrada C., (1999) "Load Adaptive control of single-link flexible arms based on a new modeling technique", *IEEE Transactions on Robotics and automation*. Vol #15, No. 5, p. 793-804.
- [4] Mahmood, I.A., Moheimani S.O.R., y Bhikkaji B., (2008), "Precise Tip Positioning of a Flexible Manipulator Using Resonant Control", *Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME*, Vol. #13, No. 2, p 180-186.
- [5] Luo Z.H., (1993), "Direct strain feedback control of flexible robot arms: new theoretical and experimental results". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. # 38, No. 11, p. 1610-1622.
- [6] Malzahn, J., Ruderman, M., Phung, A.S., Hoffmann, F., y Bertram T., (2010), "Input shaping and strain gauge feedback vibration control of an elastic robotic arm", *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*, p. 672-677.
- [7] Tumari M., Mohd Z, Ahmad M., Saéalal M. S., y Zawawi M.A., Mohamed Z., y Yusop N. M., (2011), "The direct strain feedback With PID control approach for a flexible manipulator: Experimental results", *11th International Conference on Control, Automation and Systems*, p. 7-12.
- [8] Saucedo C.H., Sánchez C., Huerta J.A., (2006) "Diseño preliminar de un banco didáctico/experimental para el estudio de esfuerzos en cadenas cinemáticas reconfigurables", *Conciencia Tecnológica* No. 32, p. 36 - 42.
- [9] Saucedo C.H., López M., Sánchez C., Correa J.L., Huerta J.A., (2009) "Reflectance difference laser measurements applied to the study of stress/strain state in materials" *Proceeding of SPIE, Septiembre 2009*. Vol. #7499, p. U1-U6.
- [10] Saucedo C.H., López M., Sánchez C., y Huerta J.A., (2010), "Sistema Experimental para el Estudio de Microdeformaciones Mecánicas Mediante Anisotropía Óptica Inducida". *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo (SOMIM)*, Vol. #3, No. 5, p. 171 - 178.
- [11] Correa J.L., Mikio T., Saucedo C.H., Ortiz J.D., y Huerta J.A., (2010), "Esparcimiento Diferencial de Luz Láser para el Estudio de Deformación en Materiales No Reflectivos" *Encuentro de investigación en Ingeniería Eléctrica ENINVIE 2010*, 25 y 26 de Marzo. (Zacatecas, México).
- [12] Saucedo C.H., Sánchez C., Esparza M.S., Castañeda L.A., (2013) "Diseño y prototipo de dispositivo flexor para deformación controlada en eslabones esbeltos de robots flexibles", Memoria de resúmenes 13° seminario de investigación, (México), p. 537 - 543.
- [13] Ramon Pallas Areny, (2007) "Sensores y Acondicionadores de Señal", Alfaomega-marcombo, México.

Recibido: 7 de marzo de 2013

Aceptado: 29 de julio de 2013