

FICHA DE RESULTADOS DE PROYECTOS

1. DATOS DEL PROYECTO

Título: Desarrollo de sensor miniaturizado con sistema de medición de fuerzas para Brazos de Medir por Coordenadas (AACMM)

Investigador/a responsable (perteneciente al IUTA): Eduardo Cuesta Gonzalez

Tfno: 985182136

E-mail: ecuesta@uniovi.es

Otros investigadores:

Braulio José Alvarez Alvarez. 09439293R, 11/08/1976

Daniel Álvarez Mántaras 10881026-W 08/05/1972

Pablo Luque Rodríguez 10858268-S, 19/09/1969

Fernando Sánchez Lasheras, 094429932-R, 14-10-1975

Daniel Gonzalez Madrugá 71445244-E 10/07/1985 (Universidad de León)

Joaquín Barreiro García. 09770421N, 26-09-1968 (Universidad de León)

Susana Martínez Pellitero. 09779844Z, 23/11/1970 (Universidad de León)

Empresas o instituciones colaboradoras:

El proyecto desarrollado estaba íntimamente relacionado con un proyecto de investigación de la convocatoria del Plan Nacional (ref. DPI2012-36642-C02-01), concedido al mismo grupo, y titulado: *Aseguramiento de la calidad y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por coordenadas*, proyecto que contaba con la colaboración de varias empresas interesadas de las que se suministraron cartas de apoyo y que se incluyen nuevamente en la presente solicitud. Por un lado estaba la empresa Hexagon Metrology, fabricante de los propios equipos, o la empresa General Dynamics European Land Systems (GDELS), empresa de ámbito multinacional con varias plantas en España (antigua General Dynamic Santa Bárbara Sistemas, GDSBS) ubicada por reciente reunificación en Trubia (Asturias). En el plano regional y local había cinco empresas interesadas, **todas ellas en el municipio de Gijón**, tres de ellas usuarias actuales de brazos de medir por coordenadas, Talleres Zitron, Delcam y Fundación Prodintec; muy interesadas en la posibilidad de calibrar "in-situ" sus propios equipos. También hay cuatro empresas más, Intelmec, Noguera Maquinaria, Hermanos Amado y Construcciones Mecánicas ELGO, todas ellas usuarias potenciales de estos equipos y muy interesadas en las posibilidades de la nueva investigación para la que se solicitó esta ayuda.

BREVE MEMORIA DESCRIPTIVA DEL PROYECTO

Resumen ejecutivo:

Los Brazos articulados de medir por coordenadas (CMA o AACMM) están experimentando una gran expansión en la industria debido principalmente a su gran flexibilidad, portabilidad, fácil manejo y a su precio reducido comparado con las Máquinas de medir por coordenadas (CMM), instrumento tradicional de inspección dimensional y geométrica. Además, los CMA se adecúan a piezas que no requieren una gran precisión en su inspección, a piezas de gran tamaño o de formas de fabricación y ensamblaje complejas gracias a su gran flexibilidad y portabilidad. Pero a pesar de sus ventajas son todavía escasos los estudios existentes sobre la fiabilidad de la medida que ofrecen estos instrumentos metrológicos. Hoy por hoy, la fiabilidad de sus mediciones y la precisión que pueden conseguir esta muy alejada de las características de las MMCs fijas e incluso de los valores que ofrecen los propios fabricantes como "precisiones máximas" alcanzables. De hecho, las medidas que proporcionan estos equipos portátiles no se aceptan con la misma facilidad ni garantías que las obtenidas por las máquinas tridimensional fijas y automatizadas, sobre todo debido a la componente

humana de los CMA. Pues detrás de cada contacto con las piezas siempre esta la fuerza, orientación y estabilidad del palpador sujetado por un operario (palpado manual). Sin duda, este trabajo incide en este aspecto, permitiendo cuantificar la separación entre medidas de CMM y medidas de CMA, por medio del desarrollo específico de un sensor de esfuerzos.

El presente proyecto se presentó como una extensión necesaria de un proyecto anterior, también financiando por el IUTA, titulado “*Estudio y desarrollo de modelos de optimización para la cualificación de brazos portátiles de medir por coordenadas*” (Ref: SV-12-GIJON-1). Dentro de este mismo proyecto se realizó un primer prototipo de Sistema de Captación de Esfuerzos (SCE) y se hicieron los primeros ensayos sobre geometrías muy básicas, que constituyen la base de conocimiento necesaria para el estudio de las fuerzas y la mejora de la fiabilidad de las mediciones con CMA's. En la presente propuesta, y al igual que en el otro proyecto, se incorporan al equipo dos personas del Área de Ingeniería e Infraestructuras de los transportes e investigadores de la Universidad de León (en este caso de Área de Ing^a de Fabricación) que colaborarán tanto en el desarrollo del nuevo sistema de captación de esfuerzos de tipo miniaturizado como en la realización de ensayos de laboratorio con los brazos de medir disponibles.

El proyecto contó con la financiación por parte del IUTA de un becario durante 3 meses, y como resultados obtenidos más notables pueden citarse los siguientes:

- Desarrollo de procedimiento de evaluación/verificación para Brazos de medir por coordenadas. Este procedimiento ha sido ensayado en laboratorio, utilizando dos brazos de medir disponibles (uno en el laboratorio de Uniovi y otro en el de UniLeon). El procedimiento desarrollado esta basado en un novedoso patrón, denominado “patrón de características”, que ha sido desarrollado dentro de un proyecto de investigación del Plan Nacional que soporta esta investigación.
- Ensayos ampliados con el sensor de esfuerzos, añadiendo nuevas geometrías y lo que es mas importante, distintos operarios, y con ello, distintas formas de medir. Los ensayos se materializaron en una biblioteca de graficas de los esfuerzos en tiempo real.
- Desarrollo de un modelo de simulación dinámica multicuerpo, para análisis de la deformación de la estructura del brazo.
- Diseño de conjunto y de detalle del nuevo sensor miniaturizado. Además de la características de ergonomía, ligereza e integración dimensional con la geométrica actual de la última parte del brazo (donde esta el sensor de esfuerzos). Se contempla de forma muy importante la opción de sincronización del momento de palpado, lo que permitirá reducir drásticamente la información transmitida e incluso posibilitar el envío de las señales de esfuerzos de forma remota (sin cables). Este sensor “wireless” sin duda redundará en una mejora de funcionamiento notable.

Detalle de tareas realizadas

Dentro de un proyecto financiado también por el IUTA en el 2012 (4 meses de un becario), se desarrolló un primer prototipo de sensor de esfuerzos con la incorporación de galgas extensométricas en un circuito (puente) sobre un palpador rígido de CMA. Este palpador, aunque primitivo (fig. 1), ya permitió hacer lecturas de flexión y compresión en tiempo real según se palpaban las piezas. Dentro de aquel proyecto se hicieron los primeros ensayos con geometrías básicas como planos y cilindros; ensayos que se repitieron contemplando distintos operarios, obteniendo gráficas de las fuerzas cometidas sobre el palpador en tiempo real. (fig. 2).

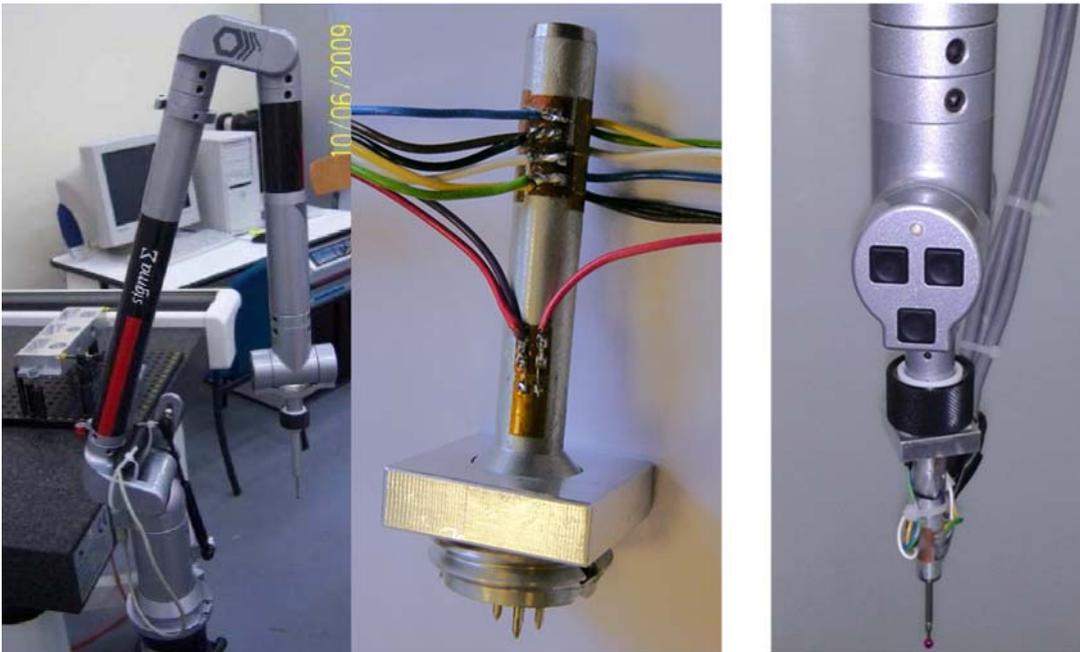


Fig. 1.- Sensor de esfuerzos para brazos de medir por coordenadas. Prototipo inicial y detalle del montaje.

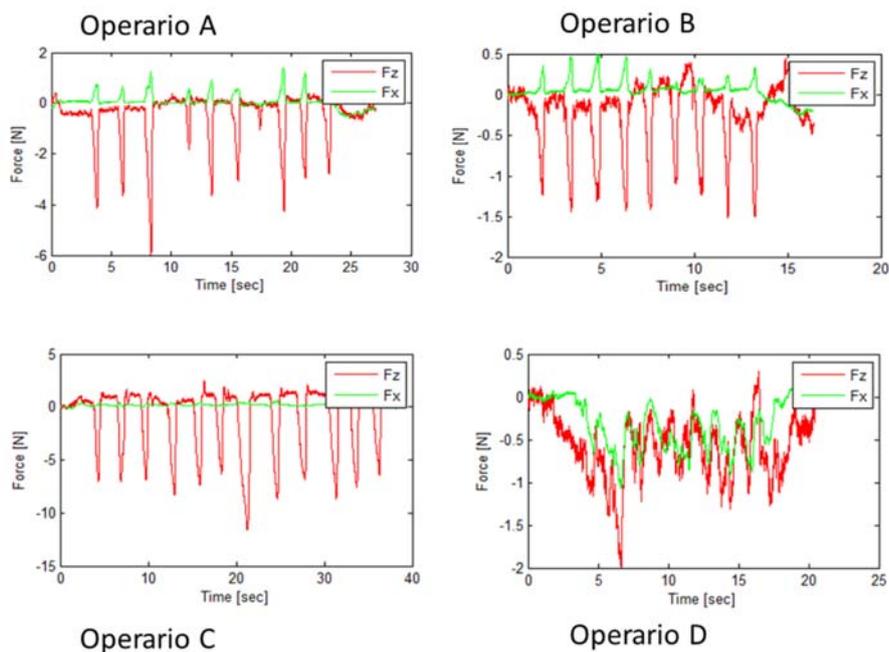


Fig. 2.- Gráficos de esfuerzos medidos sobre la misma pieza (anillo cilíndrico patrón) y con distintos operarios con el prototipo de sensor de esfuerzos desarrollado.

Posteriormente, y sin duda en parte gracias a esta nueva subvención del IUTA en 2013 (3 meses de becario) se ampliaron los ensayos a otras geometrías como conos y esferas, con evaluación de tolerancias geométricas, dimensiones y combinadas entre ellas. Puede decirse que estos estudios concluyeron en el diseño y materialización de un patrón específicamente pensado para calibración/evaluación de brazos de medir, denominado “patrón de características geométricas”. Con la ayuda de este patrón y de un accesorio para multiposición (cuyos costes de fabricación y calibración se financiaron con cargo a un proyecto del Plan Nacional de Investigación) se pudieron hacer los primeros ensayos en laboratorio. Dentro del proyecto del IUTA se hicieron ensayos de laboratorio en la Universidad de León y otros en la Universidad de Oviedo. (fig. 3), concretamente en

el laboratorio de metrología dimensional del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Los ensayos de verificación en laboratorio consistieron en dos tipos: por un lado con artefactos calibrados o verificados con MMC, y dotados de geometrías simples tipo planos y cilindros; y por otro lado, ensayos de verificación de los brazos utilizando un patrón de características[®], cuya geometría y particularidades ha dado lugar a una solicitud de patente (ref. **P201300241**, de fecha 04/03/2013).

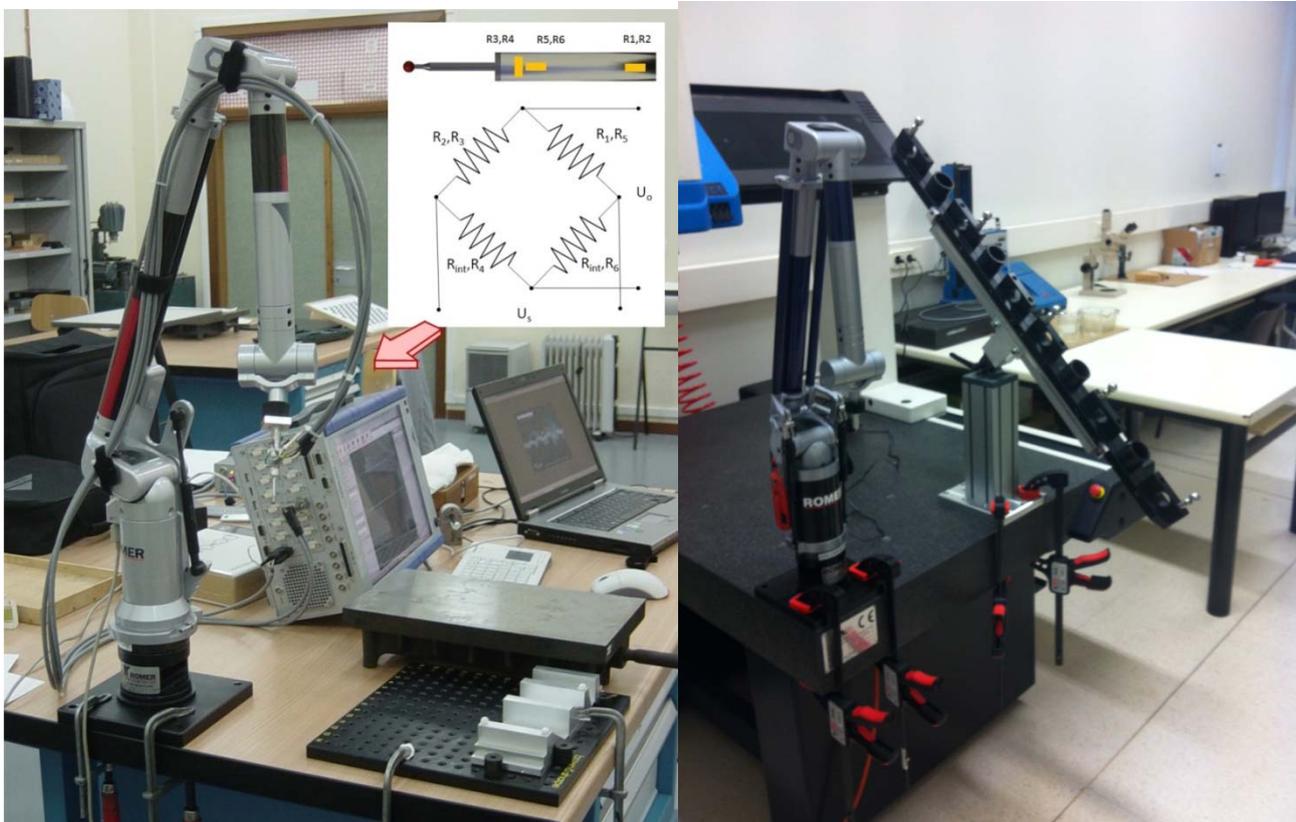


Fig. 3.- Ensayos con artefactos calibrados y con el patrón de características[®] sobre Brazos de medir por coordenadas. Izq. En el laboratorio de Uniovi (EPIG). Der. En el laboratorio de la Univ. de Leon

Asimismo, se desarrollaron modelos de corrección del error cometido por el brazo en la parte que atañe a los esfuerzos de palpado, concluyéndose que es posible la optimización de la medición con CMA cuando se conoce la dirección y fuerza de palpado, llegando a mejoras superiores a un 60 % (depende de la característica a medir) en la medida con CMA. De esta forma conseguimos que un instrumento con una altísima dependencia de la fuerza de palpado, se asemeje en cierta medida a las máquinas de medir por coordenadas fijas (CMM) donde sus sensores cometen errores de repetibilidad enormemente bajos (< 1 micra). Y aunque si bien no se pueden alcanzar estas precisiones, si que se pueden bajar las incertidumbres de medida (acercándonos a los valores de "precisión" del fabricante) y al menos, garantizar la mediciones con cierta independencia del usuario.

Como complemento a la captación de esfuerzos que se realiza sobre la pieza a palpar se desarrolló, también dentro del proyecto financiado por el IUTA, un modelo de simulación multicuerpo de las deformaciones del brazo durante una medición. Modelo que permitió comprobar que no solo se deformaba el palpador, sino también los brazos que unen las distintas articulaciones del CMA y que conforman los grados de libertad del equipo. Este modelo de simulación dinámica multicuerpo permite evaluar –en principio desde el punto de vista teórico- las deformaciones de la estructura del brazo lo que no solo puede permitir corregir los errores, sino también mejorar el diseño de estos equipos (materiales y longitudes, p.e.) y al menos, mejorar su forma de utilización.

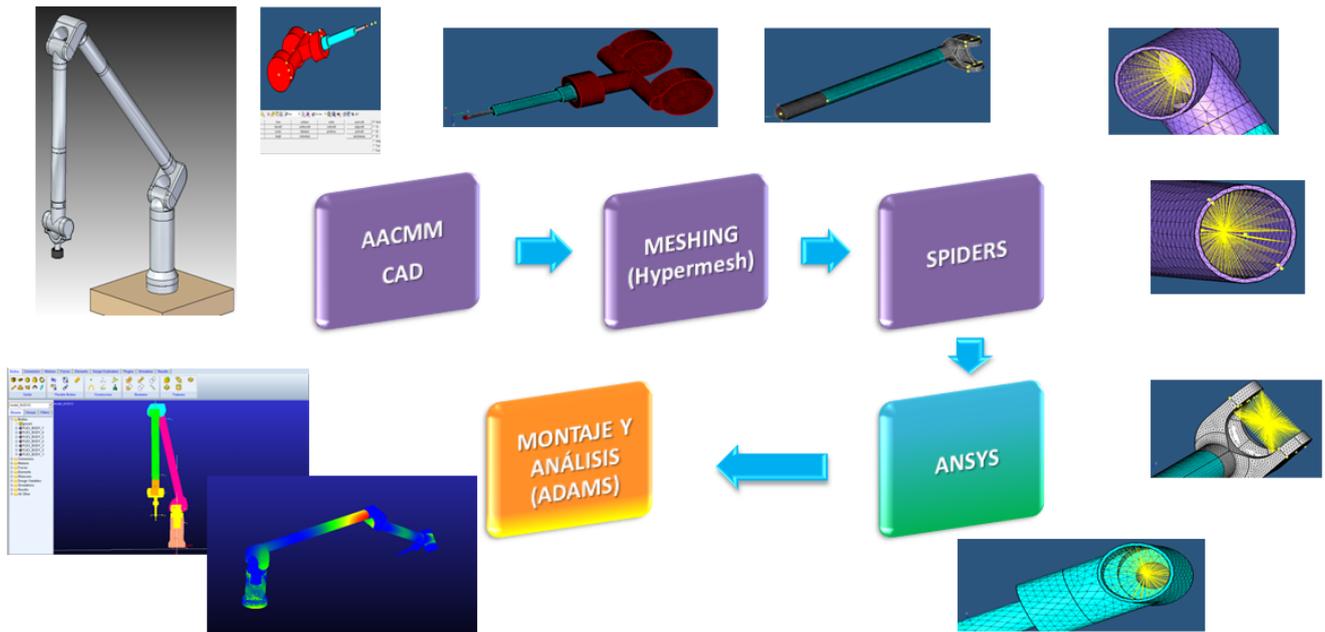


Figura 4. Esquema del sistema de simulación dinámica multicuerpo desarrollado para evaluación de la deformación de la estructura

Como acción de mejora derivada directamente del sistema de modelizado multicuerpo se puede mencionar la necesidad de contraste de los valores obtenidos de la simulación con los valores obtenidos por el sensor y con los valores de dimensiones, errores de forma, combinados, etc. medidos por el equipo (es decir, por sus encoders); de esta forma se pueden implementar modelos de corrección o minimización de la medida además de validar el propio modelo de comportamiento multicuerpo. En la fig. 4 se puede observar un resumen de los distintos equipos y software que se utilizaron, junto con capturas de pantalla del modelo de simulación final.

Un último, aunque fundamental, objetivo era el de desarrollar un nuevo prototipo de sensor con claras mejoras en cuanto a su funcionalidad y capacidad de lectura de fuerzas para reducir al máximo la influencia del propio peso y volumen del sensor en el uso cotidiano del brazo; minimizando además las lecturas al reducir (compenetrando) la lectura de las fuerzas sólo al momento en el que el usuario toma la medida. Esta integración del Sensor de medida de fuerzas, junto con su **miniaturización** en la estructura del CMA ya ha sido desarrollado cumpliendo la fase de diseño de detalle, establecidos los procesos de fabricación para las distintas partes y pendiente de financiación con la cantidad del año próximo, 2014, del proyecto del Plan Nacional, para su ejecución física. Este desarrollo conceptual del nuevo prototipo puede verse en las fig. 5. y 6 del presente informe.

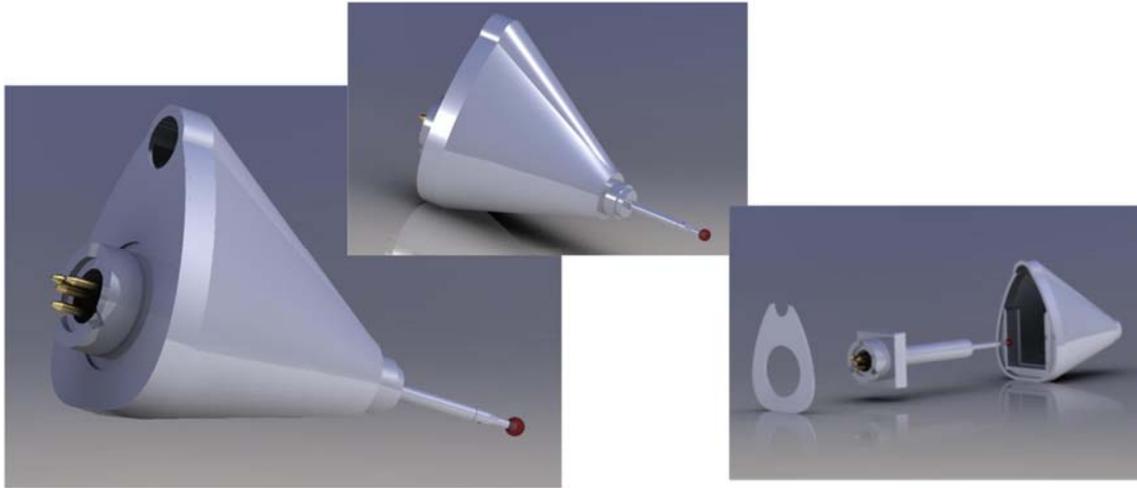


Fig. 5.- Prototipo avanzado para integración del sensor de esfuerzos. Detalle del sensor y carcasa para conexión y protección



Fig. 6.- Prototipo avanzado para integración del sensor de esfuerzos. Detalle del mango y mecanismo para integración con los botones de accionamiento (gatillo).

Con el conjunto de acciones expuestas, ha quedado clara la mejora propuesta con el presente proyecto. Se trata de acciones destinadas a la posibilidad de sustracción de la fuerza máxima obtenida de la lectura en el palpado de una determinada característica. Dentro de esta mejora se considera la implementación del sensor dentro de los programas de control de brazos comerciales existentes, bien como un paquete o aplicación exterior o bien integrable directamente al software (PC-DMIS) que de la opción de corregir las fuerzas con el palpador desarrollado

Sin embargo, se ha comprobado que la lectura de la fuerza de palpado con el sensor actual obtiene mucho mas información (se obtiene una curva en tiempo real) en función de la orientación, de las coordenadas del punto, de la distribución, etc. El algoritmo que se aplique para minimización debe tener en cuenta la característica a palpar además del valor de las fuerzas durante la medición (curva obtenida). En todo caso, este algoritmo necesita un proceso de miniaturización de la medición de fuerzas mediante galgas extensiométricas de reducido tamaño (y/o de lectura triaxial), de forma que el sistema de captación no influya en la propia forma de medir. Este SMF incluye: galgas extensiométricas miniaturizadas, su distribución y colocación, su esquema de conexión, el cableado, la lectura de las señales de las galgas, la obtención de las deformaciones, su conversión a fuerzas

mediante el modelo geométrico propuesto y la presentación de éstas estarán incluidos en el diseño. La realización física de este modelo avanzado permitirá la implementación de un sistema de sincronización de la lectura tanto de los puntos medidos (por parte del AACMM) y de las fuerzas de medición (por parte del SMF). Esta implementación permitirá a su vez simplificar el tratamiento posterior de los datos, aumentar la eficiencia del proceso y reduciendo los requisitos del sistema para su funcionamiento, puesto que al tomar un solo punto (acotado por una fracción de tiempo de todo el contacto real), se reduce enormemente los datos a procesar pudiendo, por ejemplo, **implementar una transmisión sin contacto** (Bluetooth, wifi, RF, etc.). Puede decirse entonces que pasamos de un modelo de corrección aplicado a toda la lectura del sensor (gráfica en tiempo real) a un modelo de corrección de los puntos palpados sobre la superficie de la pieza (valores discretos). Esto redundará sin duda en una espectacular mejora funcional del sensor prototipo inicial e incluso del sensor actual diseñado, y en última instancia de la fiabilidad de la medición.

Independientemente de si el modelo de corrección se aplica a una lectura continua o a puntos discretos (muy cercanos al momento exacto de palpado); los valores recogidos de las fuerzas, así como la distribución de los puntos –coordenadas- sobre la característica a medir permitirá desarrollar e implementar reglas, alarmas, consejos de buenas prácticas, etc. de utilización de los brazos en tiempo real. Se trata de desarrollar lo que se denomina un sistema KBE (knowledge Based Engineering) aplicado a la inspección de brazos de medir por coordenadas. Este objetivo futuro coincide con el desarrollo del último año del proyecto de investigación del Plan Nacional citado. “Aseguramiento de la Calidad y representación del conocimiento en la medición con sistemas portátiles de medir por coordenadas”. Ministerios de Economía y competitividad”, (Ref: DPI2012-22642-C02-01 2012-2015)

Asimismo, puede mencionarse como trabajo futuro el desarrollo de una aplicación para calibración y verificación de CMA's. Esta aplicación debe ser coherente con el nuevo método propuesto de evaluación de CMA's utilizando un patrón basado en características (como el mencionado anteriormente, en la solicitud de la patente). La aplicación esta destinada a servir de apoyo a la realización práctica de la calibración cuando esta se realice “in-situ”, en el propio taller o en el propio laboratorio de las empresas interesadas en la investigación. Esta línea de trabajo futura forma parte de una propuesta de proyecto IUTA para el 2014, liderada por el Dr. Braulio Alvarez Alvarez, que será el encargado de implementar la aplicación integrándola con el software de control de brazo de medir. Como resultados esperables de este nuevo proyecto las empresas colaboradoras que se citaron anteriormente recibirán formación y documentación para el uso óptimo de estos aparatos, además de un análisis de la precisión (incertidumbre) que pueden alcanzar con dichos aparatos, dicho de otra forma, la idea es que las empresas interesadas reciban la transferencia tecnológica del grupo de investigación.

Grado de consecución de los objetivos planteados

Desde el punto de vista de duración del mismo, el proyecto contaba con el siguiente cronograma tentativo:

CRONOGRAMA y funciones del becario que se solicita

Tarea	Meses												Comentario*	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Planificación														
Estudio y síntesis de la tecnología		x												
Análisis de la fuerza en AACMM		x												
Diseño de ensayos		x												
Sistema de Medición de Fuerzas														Becario
Diseño y Miniaturización			x											Becario
Implementación de la sonda de medición			x											Becario
Calibración			x											Becario
Implementación del software			x	x										Becario
Puesta en marcha				x										Becario
Ensayos preliminares				x										Becario
Ensayos														Becario
Ensayos operarios					x									Becario
Ensayos de características						x								Becario
Ensayo de estrategia de medición							x							Becario
Ensayo en empresa								x						Becario
Análisis de datos														Becario
Tratamiento de datos									x					Becario
Estudio estadístico									x					Becario
Caracterización de los operarios										x				Becario
Caracterización de las fuerzas										x				Becario
Análisis de los resultados														Becario
Elaboración de los modelos de corrección											x			Becario
Implementación en software											x			Becario
Ensayos de aceptación												x		Becario
Conclusiones													x	Becario
Divulgación													x	Becario

Dentro del mismo se han marcado con un círculo en rojo las tareas financiadas. El proyecto tenía una duración de 7 meses de las que se pudo financiar 3 meses del mismo, del 1-04 al 30-06, a un becario: **D. Daniel Gonzalez Madruga**, gracias a la subvención del IUTA de ref. SV-13-GIJON-1.8. Puede decirse que de las tareas previstas en el proyecto y teniendo en cuenta que la financiación recibida solo cubrió una parte pequeña del proyecto; **se han cumplido con éxito los resultados del mismo** e incluso se han superado las expectativas. Se realizaron ensayos con el sensor, no solo con distintos operarios y distintas geometrías, sino también de forma real y virtual. Esto último se refiere a la implementación del modelo de simulación dinámica multicuerpo. El diseño del nuevo sensor miniaturizado ya está finalizado y solo resta su fabricación física. Aunque dado el diseño y las geometrías que intervienen en él, con superficies complejas libres, se prevé su fabricación por métodos de fabricación aditiva (prototipado rápido) junto con fresado de algunos componentes de aluminio para realización de mecanismo interior de disparo por gatillo, sujeción del mango al brazo, etc.

Divulgación de los resultados

A continuación se exponen aquí algunos de las publicaciones que se produjeron dentro del proyecto de investigación del plan nacional (costes de ejecución) y que sin duda fueron posibles también -y sobre todo-, gracias a la subvención del proyecto anteriores del IUTA: SV-12-GIJON-1 y al correspondiente al presente informe: SV-13-GIJON-1.8, relacionados ambos con el estudio y desarrollo de modelos de optimización para la cualificación de brazos portátiles de medir por coordenadas; y que permitieron financiar íntegramente los coste de personal (4 meses en el 2012 y 3 meses en el 2013) de esta línea de investigación.

Artículos indexados en revistas JCR

D. González-Madruga, E. Cuesta, J. Barreiro, A.I. Fernández-Abia. Application of a force sensor to improve the reliability of measurement with articulated arm coordinate measuring machines. *Sensors*. 13 (8), 10430-1448, 2013.

E. Cuesta, D. González-Madruga, B.J. Álvarez, J. Barreiro. A new concept of feature-based gauge for Coordinate Measuring Arm evaluation. *Measurement Science and Technology* (en revisión, enviado el 17 Octubre 2013).

D. González-Madruga, J. Barreiro, E. Cuesta, S. Martínez-Pellitero. Influence of human factor in the AACMM performance: a new evaluation methodology. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. (en revisión, enviado el 7 Octubre 2013).

Artículos indexados en ISI Wok y Congresos Internacionales

Cuesta, E. Álvarez, B.J. Sánchez-Laseras, F. Fernandez, R.I. González-Madruga, d. Feasibility evaluation of photogrammetry versus coordinate measuring arms for the assembly of welded Structures. *Advanced Materials Research*. Vol. 498, pp.103-108, 2012

Cuesta, E. Álvarez, B.J. Martinez, S. Barreiro, J. González-Madruga, D. Evaluation of influence parameters on measurement reliability of Coordinated Measuring Arms, AIP Conference Proceedings, vol. 1413, pp 217-224, 2012

F. Sanchez-Lasheras, R.I. Fernández, E. Cuesta, B.J. Alvarez, S. Martínez, Study of the technical feasibility of Photogrammetry and Coordinated Measuring Arms for the inspection of welded structured, AIP Conference Proceedings, vol. 1413, pp. 311-318, 2012

D. González-Madruga, E. Cuesta, J Barreiro, S. Martinez-Pellitero, B.J. Álvarez. Real-Time contact force measurement system for Portable Coordinate Measuring Arms. *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*. 23 (1), pp. 267-272, 2012.

D. González-Madruga, E. Cuesta, H. Patiño, J. Barreiro, S. Martínez-Pellitero, Evaluation of AACMM using the virtual circles method, *Procedia Engineering* vol. 63, pp. 243-251, 2013

H. Patiño, D. González-Madruga, E. Cuesta, B. J. Álvarez, J. Barreiro. Study of Virtual Features in the Performance of Coordinate Measuring Arms. *Annals of DAAAM for 2013 & Proceedings of the 24th DAAAM International Symposium, "Intelligent Manufacturing & Automation"*, 23-26th October 2013, University of Zadar, Croatia.

D. González-Madruga, J. Barreiro, E. Cuesta, B. González, s. Martínez-Pellitero. AACMM Performance Test: Influence of Human Factor and Geometric Features. *Annals of DAAAM for 2013 & Proceedings of the 24th DAAAM International Symposium, "Intelligent Manufacturing & Automation"*, 23-26th October 2013, University of Zadar, Croatia.

En prácticamente todos ellos se hace referencia expresa a las ayudas concedidas por el IUTA en anteriores convocatorias de esta solicitud, en el correspondiente apartado de "Acknowledgements"

Trabajos futuros:

Como se ha comentado anteriormente, los ensayos con el sensor de esfuerzos fueron realizados únicamente en condiciones de laboratorio, por lo que una continuación clara del proyecto es ahora, la realización de **ensayos "in-situ"**, en las mismas zonas de producción, talleres o al menos en los laboratorios de las empresas interesadas. Con estos ensayos se puede validar el Procedimiento de Calibración y el patrón específicamente desarrollado gracias a los ensayos realizados y al conocimiento adquirido con el sistema de medición de esfuerzos.

También se contempla la propia **fabricación física del sensor miniaturizado** ya diseñado, junto con su puesta a punto, de forma que permita la medición discreta, aunque "en tiempo real", y sin molestias al operario de las múltiples características materializadas en el sensor. La opción de transmisión remota, sin contacto, de la fuerza cometida durante el palpado, en un instante de tiempo dado es una opción muy interesante que se valorará como implementación futura.

Por último, y quizás lo más importante, puede mencionarse como acción futura, la **implementación de software de medición** que contenga los modelos de corrección desarrollados dentro del proyecto de investigación, integrados en un sistema KBE aplicado a la inspección de brazos de medir por coordenadas. Aunque, todo a que decirlo, éste es un objetivo ambicioso a más largo plazo y que en todo caso se encuadra directamente en los resultados esperables del proyecto –trianual- del Plan Nacional.

3. MEMORIA ECONÓMICA

Financiación		Personal	Inventariable	Fungible	Otros gastos
IUTA	SV-13-GIJÓN-1.8	2250	-----	-----	-----
Otras fuentes	Referencia proyectos/contratos				
Personal Becario	Nombre	<i>Daniel Gonzalez Madruga (DNI.-71445244E)</i>			
	Tareas	<i>Desarrollo y ensayos del proyecto de investigación</i>			
	Período	<i>3 meses a tiempo completo, 01-03 al 30-06 del 2012</i>			