



www.elsevier.es/RIAI

XII Simposio CEA de Control Inteligente. SCI 2016

# Sistema inteligente de monitorización para la auscultación de tuberías mediante un robot

Fernando Castaño Romero <sup>a,\*</sup>, Gerardo Beruvides <sup>a</sup>, Rodolfo E. Haber <sup>a</sup>, Juan Jesús Muñoz <sup>b</sup><sup>a</sup> Centro de Automática y Robótica (UPM - CSIC), Ctra. Campo Real km. 0,200, SN, 28500 Arganda del Rey, España.<sup>a</sup> GEOCISA S.A. Calle de los Llanos de Jerez, 10, 28823 Coslada, Madrid, España.

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de monitorización para un robot de auscultación de tuberías en agujeros profundos. El cometido de estas tuberías es actuar como canalizaciones a la hora de inyectar materiales endurecedores del terreno, como paso previo a la realización de obras en infraestructuras subterráneas, como son los túneles. El diseño y la implementación de un sistema de monitorización tienen una serie de restricciones debido a su pequeño tamaño, condiciones de alta humedad y baja luminosidad. La tarea principal del sistema de monitorización es mejorar el seguimiento y localización del robot en el interior de tuberías de hasta 36 mm y realizar la monitorización mediante imágenes de modo que permita la trazabilidad de las labores realizadas en las infraestructuras. Para ello, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema inteligente de visión e iluminación compuesto por una cámara de alta definición y un sistema de iluminación LED, el cual permite monitorizar el estado de la tubería y el recorrido llevado a cabo por el robot en el interior de la misma. Como corroboración experimental, los resultados serán comparados con los obtenidos mediante las mediciones realizadas con otro tipo de sensores, tales como inclinómetros, acelerómetros, etc. El robot ha sido probado en condiciones extremas realizando tareas de vigilancia y localización, obteniéndose unos resultados muy prometedores. El desarrollo de este robot pretende generar unas bases científicas y técnicas que ayuden a mejorar, e incluso sustituir, los sistemas comerciales existentes para la comprobación de la calidad y el cumplimiento de tolerancias en agujeros profundos para tuberías de poco diámetro llevados a cabo en obras para infraestructuras subterráneas, como son los túneles.

## Palabras Clave:

inspección, auscultación, monitorización, robot, inteligente, visión artificial

## 1. Introducción

Para prevenir posibles derrumbamientos en la realización de túneles, se realiza un endurecimiento del terreno a través de la inyección de sustancias que cambien la estructura de la zona a perforar. Los taladros realizados para las inyecciones deben ser inspeccionados, uno a uno, con el fin de determinar la dirección que se ha seguido para el agujero. En la actualidad este seguimiento se lleva a cabo mediante métodos comerciales con limitaciones de ser una operación manual y tener restringido el rango de medición a una profundidad máxima.

Como posible solución, está el diseño de robots autónomos para inspección de tuberías o agujeros profundos, ya que es una línea de investigación muy extendida dentro de la comunidad científica. Prueba de ello, es la existencia de multitud de trabajos al respecto en la bibliografía científica.

Un robot que opere en tareas de inspección de agujeros y tuberías debe ser capaz de superar una serie de impedimentos ambientales extremos: alta presión, alta temperatura, ambiente altamente corrosivo, reducido tamaño de la tubería, paso por los codos de la tubería, acumulación o sedimentación irregular

de material en el interior, alta fiabilidad y operación con seguridad, trabajo a alta profundidad respecto a la superficie. Por tanto, dependiendo del objetivo para el que se diseñe el robot, se utilizará un tipo u otro o la combinación de varios.

En este artículo se presentan los resultados parciales obtenidos del diseño, desarrollo e implementación de uno de los módulos de un robot para auscultación de tuberías después de operaciones de taladrado. Los sistemas inteligentes de monitorización se han aplicado con éxito a los procesos de taladrado y fresado [1-3]. Adquiere especial relevancia la monitorización remota [4]. Éste es el sistema inteligente de visión e iluminación para monitorización del estado de la tubería y seguimiento de la localización del robot en el interior de la misma.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se ha realizado una revisión del estado de la ciencia y la técnica sobre robots de auscultación de tuberías (sección 2). Seguidamente, se propone el diseño de un sistema inteligente de visión e iluminación para monitorización del estado y localización del robot en el interior de la tubería, comenzando por la descripción de la configuración electrónica (sección 3) y siguiendo por el diseño mecánico (sección 4). A continuación,

se integra la parte electrónica en el interior de los módulos mecánicos (sección 5) para una posterior evaluación del robot en tareas de supervisión de tuberías a nivel de laboratorio (sección 6). En la sección 7 se resumen las conclusiones.

## 2. Estado del arte en robots de auscultación

### 2.1. Clasificación de los diferentes tipos de robots de inspección de agujeros y tuberías

Una revisión exhaustiva del estado del arte referente al desarrollo de robots de inspección de tuberías ha sido presentada por Ismail et al. Los autores realizan una definición en función de la forma de propulsión de cada robot [5], incluyendo un resumen de los tipos de robot existentes hasta octubre de 2012 y sus correspondientes ventajas y desventajas.

A continuación se citan algunos ejemplos destacados de robots autónomos de inspección con diferentes modos de locomoción y para aplicaciones muy diversas. Por ejemplo, en un estudio, a partir de las condiciones ambientales de trabajo extremas comentadas en párrafos anteriores, Liu et al. [6] presentan un sistema que combina el principio de funcionamiento de dos tipos de propulsión: ruedas motrices y ruedas estabilizadoras. Experimentalmente demuestran que el diseño que han desarrollado tiene un gran potencial en aplicaciones de robots de inspección de agujeros profundos.

En cambio, utilizando un sistema de locomoción por arrastre, Ding et al. presentan un robot para inspección de agujeros en los pozos petrolíferos [7]. Este robot puede incorporar diferentes dispositivos acoplados: cámara, sensor de corriente, dispositivo para limpiar tuberías, máquina de soldadura de unión de tubos, dispositivo de spray anticorrosión, etc. También para inspección de tuberías pero en este caso de gas, Gao et al. describe el diseño de un mecanismo diferencial con capacidad diferencial adaptativa en el codo para conseguir que el robot recorra largas distancias sin necesidad de información sensorial muy sofisticada y con un único motor de propulsión [8].

### 1.2. Métodos de seguimiento y localización del robot en el interior de una tubería

Los robots de inspección de tuberías pueden clasificarse, además de por el tipo de medio de locomoción, también por el tipo de sistema de seguimiento y localización. Una tendencia a la hora de elegir estos sistemas es adaptar los métodos ya existentes con el mismo objetivo pero en ambientes de exterior. En este sentido, pueden citarse dos robots autónomos para inspección del pavimento, incluyendo uniformidades y desgaste, con movimiento auto-controlado y planificación automática de la trayectoria [9, 10]. Los robots disponen, entre otros, de los siguientes sensores: ultrasonidos, telémetro láser (localizador láser), equipo de captura de imágenes y medidor de distancia recorrida.

También en ambientes exteriores, puede destacarse un trabajo cuyo sistema de seguimiento y localización será adaptado por otros autores para robots de inspección del interior de tuberías. Ese sistema mide el ángulo de orientación de desplazamiento entre el cuerpo del robot y el tubo mediante

dos cámaras situadas en la parte delantera y trasera del robot, utilizando para ello un algoritmo de procesamiento de imagen [11].

Si se trasladan estos sistemas de seguimiento del exterior al interior de una tubería aparecen una serie de problemas añadidos debido a la alta humedad, baja luminosidad, imposibilidad de posicionamiento por satélite, por solo mencionar algunas de las severas restricciones y requisitos. A pesar de estas dificultades pueden encontrarse trabajos que tratan de dar solución a este reto.

Dos de esos reportes, utilizan un tipo de sistema de seguimiento y localización de un robot de inspección de tuberías basado en impulsos electromagnéticos de extrema baja frecuencia (ELF-EP) y que ha sido propuesto en diferentes trabajos [12, 13]. Ese sistema incluye un emisor ELF-EP, un conjunto de sensores y un sistema de procesamiento de datos. La localización se realiza desde el exterior de la tubería mediante la recepción de la señal emitida por el robot desde el interior.

Por otro lado, existe una tendencia en el diseño de los sistemas de seguimiento y control del robot basado en la captación de información proporcionada por diferentes tipos de sensores, como pueden ser inclinómetros, acelerómetros, sensores de fuerza, medidores de desplazamiento, etc. Por ejemplo, basado en sensores angulares, Park et al. [14] proponen un método para estimar la posición relativa entre el cuerpo principal del robot (PAROYS-II) y la tubería usando un mecanismo de pantógrafo. El método sugerido para la estimación de la inclinación de las tuberías funciona bien y permite al robot reducir su consumo de energía y las tensiones en sus componentes mediante un control adecuado de la fuerza.

### 2.2. Método de localización y seguimiento del robot basado en visión artificial

Además de los métodos de localización y seguimiento señalados en el apartado anterior basados en ondas electromagnéticas y sensores, existe otra modalidad que intenta aprovechar los equipos de iluminación y captación de imágenes que tienen acoplados algunos robots de inspección. Este sistema consiste en un sistema basado en visión cuya funcionalidad inicial es detectar defectos, uniformidades y obstrucciones en el interior de los agujeros y que han sido incorporados a un número elevado de robots de inspección. Estos sistemas utilizan una cámara CCD, un sistema de iluminación y un emisor láser. Con ello se puede aprovechar el sistema de captación de imágenes para realizar el seguimiento y localización del robot dentro de la tubería.

Lee et al. [15] proponen un método basado en la proyección de un haz luminoso láser lineal sobre el fondo de la tubería y mediante la observación de la distribución de sombras poder detectar en qué tramo se encuentra el robot. Painumgal et al. muestran un procedimiento similar al anterior que utiliza también la emisión de un haz láser, en este caso cónico, que proyecta una circunferencia en el fondo de la tubería [16]. El estudio del desplazamiento de esta circunferencia respecto al centro de la imagen capturada a intervalos permite el control y equilibrado del vehículo autónomo en el interior de la tubería.

El robot que diseñó y fabricó por GEOCISA tiene unas dimensiones tanto de diámetro como de longitud inferiores a los trabajos comentados anteriormente. Este hecho dificulta enormemente la posibilidad de incorporar algunas tecnologías emergentes al robot autónomo de inspección de agujeros. Como solución puede estudiarse la viabilidad de utilizar tecnologías de inspección desarrolladas para cirugía robótica basadas en visión artificial [17]. Las especificaciones y los requisitos son, en cierto modo, parecidas a las que tiene que enfrentarse el robot en un agujero profundo.

Como ya se ha comentado, en este trabajo no se presenta el diseño completo del robot, sino solo de uno de sus módulos (el sistema inteligente de visión e iluminación) para su posterior acoplamiento a la estructura general del mismo.

### 3. Configuración electrónica del sistema inteligente de visión e iluminación

#### 3.1. Descripción general

El circuito integrado en el módulo de grabación consta de un sistema de alimentación, un interruptor general, un circuito de protección IC para las baterías, un sistema de iluminación LED y la propia micro video cámara (ver Figura 1).

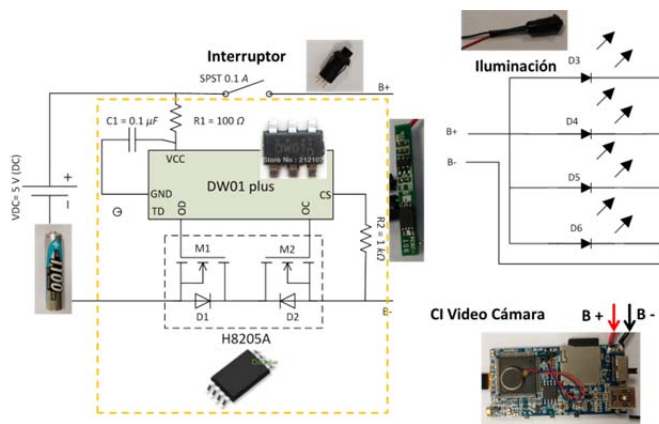


Figura 1: Esquema general de la configuración electrónica del módulo de grabación

Del circuito específico que conforma el sistema de alimentación y protección IC se puede destacar que incluye cuatro baterías recargables AAA de 1,2 V con una corriente de 1050 mA/h. El sistema de alimentación suministra energía a un circuito integrado cuya función es proteger a las baterías de la corriente suministrada por un puerto mini USB en el momento de la carga. La salida de este sistema proporciona el voltaje de alimentación tanto al sistema de iluminación como a la video cámara.

#### 3.2. Sistema de iluminación

Cuatro indicadores de voltaje LED de color blanco (OXL/CLH/80/P/-/AC/Flxx/-) en paralelo conforman el sistema de iluminación. Cada indicador está integrado en un

chip y protegidos con una cubierta metálica exterior de  $\phi 9$  mm. La forma de montaje es mediante una rosca  $\phi 6.9$  mm.

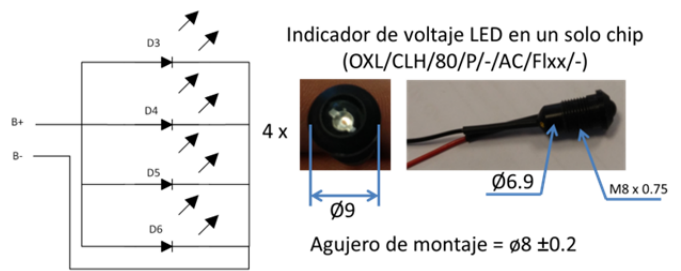


Figura 3: Sistema de iluminación LED de color blanco

#### 3.3. Sistema de grabación

El objetivo principal del diseño de este módulo de visión es dotar de un tiempo suficiente de grabación a la tarea de inspección del robot RA2. Por ello, el módulo más importante de los sistemas integrados es el de grabación. Se necesita llegar a un consenso entre calidad de la imagen y dimensiones del dispositivo a la hora de la cámara, ya que existen unos requisitos muy estrictos en cuanto a tamaño, como consecuencia del pequeño diámetro de las tuberías en las que se introducirá el robot.

Después de una búsqueda muy exhaustiva, el dispositivo elegido es el mostrado en la Figura 4. Se trata de una microvideo cámara S01. Además de cumplir los requisitos de tamaño y resolución, pueden resaltarse una serie de características como son alta capacidad de almacenamiento, micrófono, antena para ser controlable remotamente, bajo consumo, buena tasa de imágenes por segundo, etc.

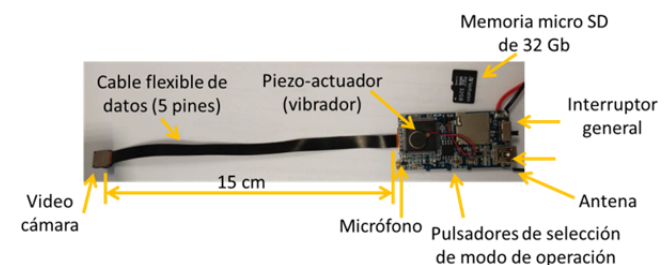


Figura 4: Esquema descriptivo de los componentes que integran la cámara

#### 3.4. Acceso a datos y alimentación (micro USB)

El conector micro USB alojado en el dispositivo se utiliza tanto para cargar las baterías como conexión para tener acceso a los datos almacenados en la tarjeta SD de 32 GB. La iluminación del LED rojo de forma continua indicaría que la batería está cargada.



Figura 5: Componentes para el acceso a datos y alimentación (micro USB)

#### 4. Diseño mecánico del módulo

En la Figura 6, se ilustra una visión general del acoplamiento y montaje del módulo de grabación. El diseño mecánico cumple una función de integración y sujeción de los componentes de la cámara, LEDs, interruptores, conector USB y baterías. En esta figura se resaltan cada una de las piezas que conforman la parte mecánica del módulo de grabación: la tapa frontal, porta-cámara, porta-baterías AAA, cilindro exterior, y el acople y rodamiento.

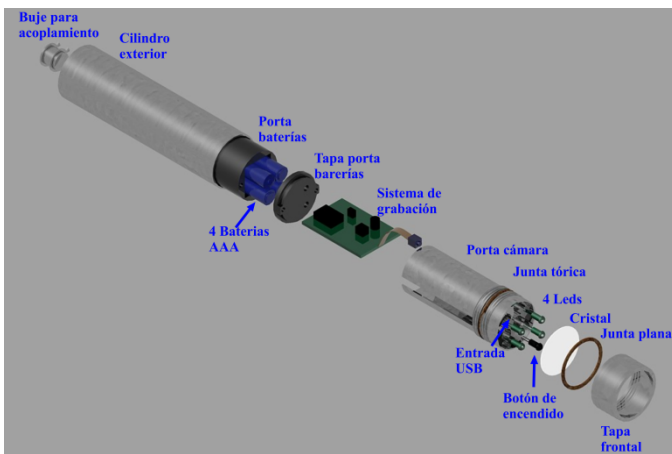


Figura 6: Esquema de montaje 3D del módulo de grabación

#### 5. Integración del módulo de visión e iluminación

Una de las etapas en el desarrollo de este módulo de grabación es la integración de todo el sistema electrónico dentro del módulo mecánico. Esta integración puede observarse en un esquema 3D en la Figura 7.

La inserción de la cámara, los LEDs, el interruptor general y el conector USB en la pieza que hemos denominado “porta-cámara”, quizá sea la parte más crítica y compleja de toda la integración, la cual se muestra en la Figura 7.

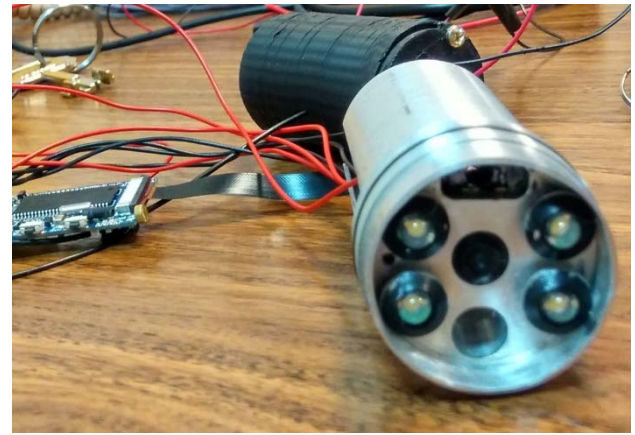


Figura 7: Componentes electrónicos a integrar. Vista frontal de la integración de los LEDs y la cámara

#### 6. Resultados experimentales

El sistema inteligente de visión e iluminación acoplado al resto del robot fue evaluado durante la realización de diferentes ensayos de operaciones de monitorización del estado de tuberías y seguimiento de su localización en el interior de la propia tubería. En estas pruebas preliminares se obtuvieron muy buenos resultados, tanto por el sistema de visión como por el resto de sensores incluidos en el robot. En la Figura 8 se aprecia el robot en el interior de una tubería transparente realizando una operación de auscultación.

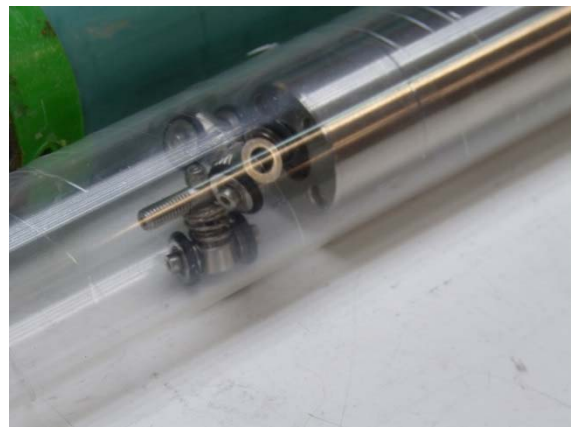


Figura 8: Sistema de visión acoplado al robot en una tarea de monitorización

#### 7. Conclusión

La contribución fundamental de este trabajo ha sido el diseño, desarrollo e implementación de un robot para auscultación de tuberías. Este sistema ha surgido como respuesta a los problemas actuales que presentan los métodos comerciales a la hora de monitorizar el resultado de agujeros profundos sobre el terreno.

Específicamente, en este trabajo se ha presentado un resultado parcial que consiste en el desarrollo de un sistema inteligente de visión e iluminación compuesto por una cámara

de alta definición y un sistema de iluminación LED. Éste ha permitido realizar tareas de apoyo a la monitorización del estado de la tubería y también del recorrido seguido por el robot en el interior de la tubería.

Finalmente, este sistema ha sido evaluado durante la realización de diferentes ensayos de operaciones de monitorización del estado de tuberías y seguimiento de su localización en el interior de la propia tubería.

Este trabajo crea las bases para investigaciones futuras en el ámbito del diseño de sistemas inteligentes para la monitorización basada en visión artificial de procesos físicos y sistemas complejos.

## English Summary

### Intelligent monitoring system for pipe auscultation by robot.

#### Abstract

This article describes the design, development and implementation of a robot for the pipe auscultation in deep holes. The role of these pipelines is to act as channelings in order to inject some substances for hardening terrain, as prior step to performing underground infrastructure works, such as tunnels. The monitoring system has a number of restrictions arising from their small size, low humidity and light. The main task of this module is to support the tracking and tracing of the robot inside pipe 36 mm. To do this, this work proposes the development of an intelligent vision system and lighting consisting of a high-definition camera and a LED lighting system, which allows to support task of condition monitoring of the pipe and tracking of the robot inside the pipe. As experimental corroboration, the results will be compared with those obtained by measurements made with other sensors such as inclinometers, accelerometers, etc. The robot has been tested under extreme conditions performing tasks of monitoring and locating, obtaining a promising results. The development of this robot aims to create a scientific and technical basis to help improve and even replace, existing commercial systems for checking the quality and compliance with tolerances in deep holes for pipes of small diameter carried out in works underground infrastructure, such as tunnels.

#### Keywords:

inspection, auscultation, monitoring, robot, intelligent, artificial vision.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del proyecto R2A: Sistema Inteligente de Monitorización para Auscultación de Taladros financiado por GEOCISA S.A. Los autores también quisieran agradecer al proyecto "IOSENSE:

*Flexible FE/BE Sensor Pilot Line for the Internet of Everything project*" con referencia PCIN-2015-123, cofinanciado por ECSEL JU y MINECO.

## Referencias

- [1] R. M. Del Toro, M. C. Schmittiel, R. E. Haber-Guerra, and R. Haber-Haber, "System identification of the high performance drilling process for network-based control," in *2007 Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007*, 2008, vol. 1 PART B, pp. 827-834.
- [2] R. E. Haber, R. Haber, A. Alique, and S. Ros, "Application of knowledge-based systems for supervision and control of machining processes," *Handbook of software engineering and knowledge engineering*, vol. 2, pp. 673-710, 2002.
- [3] F. Penedo, R. E. Haber, A. Gajate, and R. M. Del Toro, "Hybrid incremental modeling based on least squares and fuzzy K-NN for monitoring tool wear in turning processes," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Article vol. 8, no. 4, pp. 811-818, 2012, Art. no. 6224180.
- [4] R. E. Haber, K. Cantillo, and J. E. Jiménez, "Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA," *Sensors and Actuators, A: Physical*, Article vol. 119, no. 2, pp. 418-426, 2005.
- [5] I. N. Ismail *et al.*, "Development of in-pipe inspection robot: A review," Kuala Lumpur, 2012, pp. 310-315.
- [6] Q. Liu, T. Ren, Y. Li, and Y. Chen, "Down-hole robots: Current status, challenge and innovation," Takamastu, 2013, pp. 1703-1707.
- [7] F. Ding, L. Shouyong, L. Jin, W. Peng, Z. Kui, and H. Chaobin, "Research on key technology in downhole crawling robot," London, 2009, pp. 536-539.
- [8] X. Gao, X. Jiang, S. Jiang, and H. Sun, "Analyzing of tri-axis differential in-pipe robot with adaptive differential capability for moving inside pipelines," Jilin, 2011, pp. 564-567.
- [9] J. R. Chang, S. C. Kang, Y. H. Tseng, C. H. Tseng, and P. H. Wu, "The study in using an autonomous robot for pavement inspection," Kochi, 2007, pp. 229-234.
- [10] J. R. Chang, Y. S. Su, T. C. Huang, S. C. Kang, and S. H. Hsieh, "Measurement of the International Roughness Index (IRI) using an autonomous robot (P3-AT)," Austin, TX, 2009, pp. 325-331.
- [11] C. Choi and S. Jung, "Pipe inspection robot with an automatic tracking system using a machine vision," Busan, 2006, pp. 1285-1290.
- [12] H. Qi, X. Zhang, H. Chen, and J. Ye, "Tracing and localization system for pipeline robot," *Mechatronics*, vol. 19, no. 1, pp. 76-84, 2009.
- [13] H. Qi, J. Ye, X. Zhang, and H. Chen, "Wireless tracking and locating system for in-pipe robot," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 159, no. 1, pp. 117-125, 2010.
- [14] J. Park, D. Hyun, W. H. Cho, T. H. Kim, and H. S. Yang, "Normal-force control for an in-pipe robot according to the inclination of pipelines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 12, pp. 5304-5310, 2011.
- [15] D. H. Lee, H. Moon, and H. R. Choi, "Landmark detection of in-pipe working robot using line-laser beam projection," Gyeonggi-do, 2010, pp. 611-615.
- [16] U. V. Painumgal, B. Thornton, T. Uray, and Y. Nose, "Positioning and control of an AUV inside a water pipeline for non-contact in-service inspection," San Diego, CA, 2013: IEEE Computer Society.
- [17] M. Ovinis, D. Kerr, K. Bouazza-Marouf, and M. Vloeberghs, "Machine vision for the inspection of surgical Tasks: Applications to robotic surgery systems," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 70, pp. 338-344, 2010.