

## Sistema robótico para la inspección y análisis estructural de túneles

E. Menendez\*, J.G. Victores, C. Balaguer

Robotics Lab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automatización, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid, España

### Resumen

La inspección y mantenimiento de túneles son necesarias para que estas infraestructuras continúen funcionando correctamente. Estas operaciones son normalmente realizadas de forma manual por operadores expertos requiriendo mucho tiempo y sin garantías de un control de calidad. La inspección y el mantenimiento con sistemas automatizados proporcionan una mayor productividad, calidad y repetibilidad. Este trabajo presenta el proyecto europeo ROBO-SPECT dentro del séptimo programa marco (FP7). El principal objetivo de ROBO-SPECT es proporcionar una alternativa automatizada, más rápida y fiable a la inspección manual de túneles. El proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema robótico con múltiples grados de libertad, compuesto por un vehículo, una grúa extensible y un brazo robótico de gran precisión. Un sistema de visión artificial para detectar defectos en túneles y una herramienta con sensor de ultrasonidos para medir el ancho y la profundidad de las grietas detectadas también han sido desarrollados. *Copyright* © 2017 CEA.

### Palabras Clave:

Automatización, túnel, inspección, mantenimiento, control autónomo, robots.

### Datos del Proyecto:

Denominación del proyecto: ROBotic System with Intelligent Vision and Control for Tunnel Structural INSPECTion and Evaluation

Referencia: 611145

Investigador/es responsable/es: Carlos Balaguer

Tipo de proyecto (internacional, nacional, autonómico, transferencia): Internacional

Entidad/es financiadora/s: Comisión Europea

Fecha de inicio/fin: 01/10/2013-01/10/2016

### 1. Introducción

Uno de los mayores desafíos que los ingenieros civiles se encuentran es la inspección y el mantenimiento de las infraestructuras existentes para asegurar que puentes, carreteras, tuberías y túneles continúen proporcionando un servicio fiable y en condiciones seguras (Montero et al., 2015) (Balaguer et al., 2014).

El correcto funcionamiento de estas infraestructuras es perecedero debido a factores artificiales y naturales, un mantenimiento inadecuado o el efecto del envejecimiento.

Túneles de carreteras, autovías, metro, etc. han aumentado en longitud y número, y continuarán haciéndolo a escala global. Algunos túneles todavía en servicio fueron construidos hace 50 años, y muchos han excedido su vida útil (Bergeson et al., 2015). La longitud total de los túneles en Europa en el año 2002 ha aumentado en 15000 km (Haack, 2002).

La humedad, el polvo y la ausencia de luz natural son algunos de los factores ambientales presentes en túneles. La inspección en este ambiente poco amigable es frecuentemente realizada por operadores expertos. Este factor humano no garantiza un control de calidad en las inspecciones.

La inspección automática, económica, y exhaustiva de túneles mejorará la seguridad a corto y largo plazo e incrementará la productividad. En este trabajo, se expone el sistema robótico ROBO-SPECT, que presenta una solución prometedora a los problemas descritos. Las siguientes secciones describen el proyecto ROBO-SPECT, los diferentes componentes del sistema, su rol en el proceso de inspección, la tecnología utilizada en cada subsistema y los pasos del proceso de inspección.

#### 1.1. Defectos presentes en túneles

El tipo de los defectos que pueden aparecer en la superficie de los túneles depende de los materiales de construcción (hormigón, acero, madera, mampostería, etc.). La mayoría de revestimientos de túneles están construidos con materiales cerámicos y paneles de metal.

Los defectos más comunes que aparecen en los revestimientos de los túneles son los siguientes:

- Grietas que son fracturas lineales en el cemento causadas por fuerzas que exceden la tensión de rotura.

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: emenende@pa.uc3m.es (E. Menendez), jcgvicto@ing.uc3m.es (J.G. Victores), balaguer@ing.uc3m.es (C. Balaguer)

URL: roboticslab.uc3m.es

- Fisura superficial o “spalling” es el desprendimiento de hormigón que deja una depresión de forma aproximadamente circular u ovalada (Hertz, 2003).
- Delaminación es un agujero bajo la superficie formado por agua y aire que están atrapados bajo la superficie.
- Eflorescencia es un depósito de hidróxido de calcio que se forma en la superficie del hormigón.

## 2. Proyecto europeo ROBO-SPECT

ROBO-SPECT es un proyecto de investigación cofinanciado por la comisión europea bajo el séptimo programa marco (FP7) ICT-2013.2.2, que comenzó en octubre de 2013 y terminó en octubre de 2016. Dicho proyecto está compuesto por un consorcio de 12 partners y es coordinado por el Instituto de Comunicación y Sistemas Informáticos, ICCS por sus siglas en inglés.

El objetivo general de ROBO-SPECT es la inspección de forma automática, rápida y fiable de los defectos presentes en los túneles, además este sistema proporciona una solución que combina en un paso la inspección y el análisis estructural en detalle sin interferir con el tráfico (Montero et al., 2015). La Figura 1 muestra el sistema robótico ROBO-SPECT.



Figura 1. ROBO-SPECT es un proyecto de investigación cofinanciado por la comisión europea bajo el séptimo programa marco.

Los objetivos específicos de este sistema robótico son los siguientes:

- Aumentar la velocidad en las inspecciones y su fiabilidad.
- Proporcionar una evaluación de los datos además de la inspección.
- Minimizar el uso de inspectores de túneles, mejorando las condiciones de trabajo de éstos.
- Reducir los costes de inspección.
- Mejorar la seguridad de los viajeros.
- Reducir el tiempo que los túneles están cerrados para las inspecciones.

En resumen, ROBO-SPECT responde a las siguientes necesidades:

- Alto coste de las construcciones de los nuevos túneles.

- La incapacidad actual del conjunto de túneles para hacer frente a la demanda incremental de transporte.
- Decremento de los tiempos de inspección y evaluación para minimizar los cierres de túneles.
- Los tiempos de inspección y evaluación están muy limitados.
- Actualmente, las inspecciones de túneles son generalmente realizadas mediante observaciones periódicas por inspectores que identifican los defectos estructurales y los clasifican manualmente.
- La clasificación de los defectos presentes en los túneles poco fiable y la ausencia de análisis ingenieril.

## 3. Sistema Integrado ROBO-SPECT

El sistema ROBO-SPECT está compuesto por 3 componentes diferentes que permiten la inspección y evaluación de túneles. El primer componente es el sistema robótico que incluye los diferentes sensores que se utilizan durante la inspección (Figura 2). El segundo componente es la estación de control en tierra, GCS por sus siglas en inglés, la cual funciona como unidad central para monitorizar la misión del robot y comunicarse con éste. El GCS también vincula el robot con el tercer componente, la sala de control (CR). La CR está equipada con ordenadores que contienen el software de evaluación estructural. Este software utiliza los resultados de la inspección para generar un informe completo de evaluación sobre el estado del túnel.

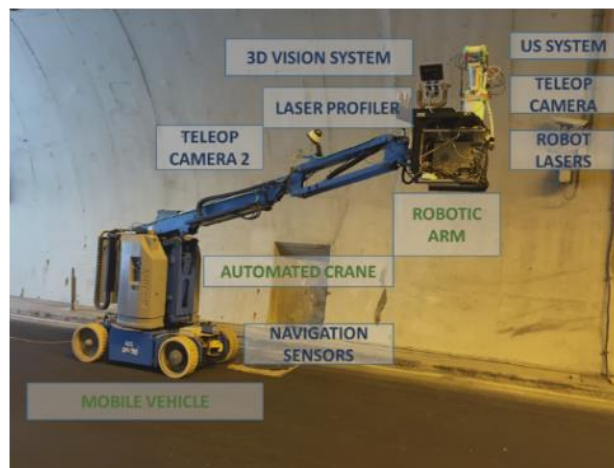


Figura 2. El sistema robótico ROBO-SPECT está compuesto por un vehículo, una grúa, un brazo robótico, una herramienta con sensor de ultrasonidos, un sistema de visión, un escáner láser 3D y unas cámaras de teleoperación.

### 3.1. Sistema Robótico

El sistema robótico está compuesto por un vehículo robotizado capaz de extender una grúa automatizada a las dimensiones de túneles de metro y carretera. Con el objetivo de medir el ancho y profundidad de las grietas detectadas en el túnel, el sistema robótico está equipado con una herramienta de inspección con el sensor de ultrasonidos (US) y un brazo

robótico para posicionarlos con exactitud. Un conjunto de cámaras de visión por computador se utiliza para detectar grietas y otros defectos en la superficie del túnel, y un escáner láser 3D proporciona datos para detectar deformaciones del túnel en el software de evaluación. Un conjunto de cámaras extra se sitúa en la grúa y una cámara IP se posiciona en la punta del brazo robótico para un modo adicional de teleoperación. El diseño final del sistema robótico y sus diferentes componentes se muestra en la Figura 2 y Figura 4. El diseño mecánico del sistema está basado en el utilizado en el proyecto europeo dentro del sexto programa marco TUNCONSTRUCT (Victores et al., 2011), que utiliza un vehículo similar, una grúa y un brazo robótico.

### 3.1.1. Vehículo

La plataforma robótica es capaz de avanzar a lo largo del túnel para cubrir la aplicabilidad del sistema robótico. Este vehículo navega de forma autónoma siguiendo la pared del túnel a una distancia constante y evita las colisiones utilizando los láseres 2D delantero y trasero. La navegación está basada en la localización y mapeado simultáneos, SLAM por sus siglas en inglés. Un sensor de navegación detecta balizas reflectantes que se sitúan a ambos lados de la carretera, con el objetivo de actualizar la localización del robot en el túnel y simultáneamente construir el mapa 2D de la sección navegada. Este mapa se puede utilizar para mejorar la precisión en la navegación en las sucesivas inspecciones. La Figura 3 muestra la plataforma robótica compuesta por el vehículo y la grúa automatizada.



Figura 3. Vehículo y grúa extensible del sistema robótico.

### 3.1.2. Grúa Automatizada

La grúa ha sido sensorizada instalando encoders lineales y angulares en las articulaciones para controlar la posición y la orientación de la plataforma. Las uniones del sistema se han adaptado con frenos especiales para minimizar las vibraciones en las partes. El extremo de la grúa ha sido rediseñado para transportar una plataforma con el brazo robótico equipado con el sensor de ultrasonidos, el conjunto de cámaras en el mecanismo pan-tilt y el escáner láser 3D. La grúa puede posicionar esta plataforma a una altura máxima de 10 m desde el suelo, suficiente para la mayoría de los túneles. Esta plataforma también incluye un láser 2D para evitar colisiones mientras se mueve la grúa.

### 3.1.3. Brazo robótico

El brazo robótico de alta precisión situado en la plataforma de la grúa es el Mitsubishi PA-10, un manipulador industrial de 7 grados de libertad (GdL). 6 GdL se requieren para posicionar y orientar el extremo final del manipulador en un punto dentro de su espacio de trabajo. El grado de libertad adicional proporciona redundancia para la evitación de obstáculos y la corrección de la orientación. El espacio de trabajo del robot oscila entre varios centímetros y 1 metro aproximadamente desde la base del manipulador hasta el extremo final. Este espacio está limitado por singularidades cinemáticas y auto-colisiones. La herramienta con el sensor de ultrasonidos está situada en la punta del robot. La misión principal del manipulador es posicionar dicha herramienta en grietas del túnel para realizar medidas de ancho y profundidad. Para calcular una trayectoria segura al punto final, un láser 2D se sitúa en un eslabón del brazo para escanear los alrededores de la grieta y crear una nube de puntos de la superficie del túnel antes de mover el sistema. La Figura 4 muestra el brazo robótico, el sistema de visión situado en el mecanismo pan-tilt y el escáner láser.

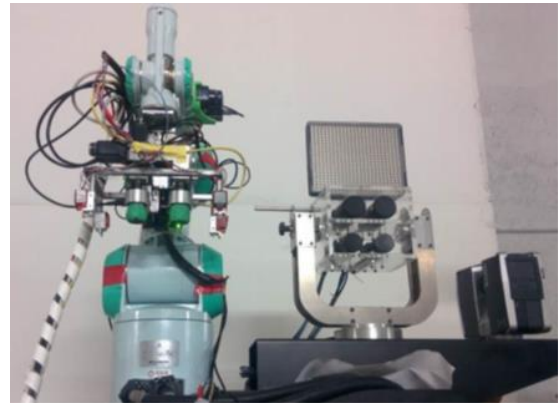


Figura 4. Los componentes de ROBO-SPECT situados en la plataforma de la grúa: el brazo robótico, el sistema de visión con el mecanismo pan-tilt y el escáner láser.

### 3.1.4. Sistema de Visión

El sistema de visión está compuesto por dos pares de cámaras de 9.1 MP para detectar diferentes defectos en el túnel durante la inspección y un sistema de iluminación para operar en las condiciones lumínicas adecuadas. Un mecanismo pan-tilt para apuntar estas cámaras es situado en la plataforma de la grúa. Es importante destacar que las cámaras necesitan posicionarse a una distancia controlada de la pared del túnel para mantener una resolución de la imagen de 1 mm de precisión. El primer par de cámaras estéreo se encarga de identificar diferentes defectos que se encuentran normalmente en túneles, como grietas, spalling y eflorescencia. La detección de estos defectos se realiza utilizando técnicas de visión artificial semi-supervisada. Redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) son entrenadas con datos de imágenes reales de defectos de túneles. En el caso de las grietas, información 3D se extrae para estimar su posición y orientación en tiempo de ejecución. Estos datos se envían al robot para que mueva la grúa cerca de la grieta, y luego mueva el brazo robótico para tocar la superficie del túnel con la herramienta de

inspección con el sensor de ultrasonidos. El segundo par de cámaras toma imágenes estéreo de las grietas detectadas para la reconstrucción 3D de modelos en la herramienta software de análisis estructural.

### 3.1.5. Escáner láser

Un escáner láser es situado en la plataforma de la grúa para inspeccionar la deformación estructural del túnel con una exactitud de 2 mm. El láser escogido es capaz de producir una nube de puntos de 360 grados con una ratio de escaneo de un millón de puntos por segundo.

### 3.1.6. Herramienta de inspección con Sensor de Ultrasonidos

La herramienta con el sensor de ultrasonidos se sitúa en el extremo final del manipulador. Esta herramienta ha sido específicamente diseñada en el proyecto ROBO-SPECT para medir la anchura y profundidad de una grieta mientras está en contacto con la superficie del túnel (Figura 5). La medida de la profundidad se realiza utilizando dos transductores piezoeléctricos que se deben posicionar a ambos lados de la grieta (Marioli et al., 1992). Con respecto a la medida del ancho de la grieta, un sensor de contacto corredizo se utiliza para escanear la superficie. Éste se posiciona utilizando un mecanismo de traslación en el extremo del manipulador. Cuando el sistema finaliza de tomar las medidas, el manipulador retira los sensores de la superficie.

Como parte de la herramienta de inspección, un marco rectangular con sensores de contacto en sus esquinas es situado en el extremo del brazo robótico. Estos sensores de contacto, actualmente implementados como pulsadores normalmente cerrados, permiten detectar la superficie del túnel durante la aproximación de la herramienta de inspección, además de mantener una posición estable hasta que los sensores terminen de tomar las medidas.

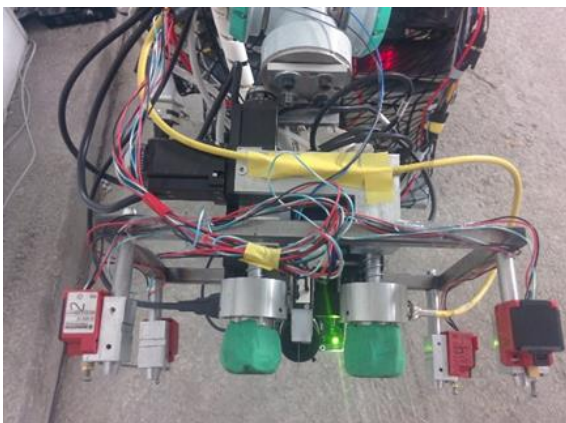


Figura 5. Los sensores de contacto situados en las esquinas del marco rectangular permiten detectar la pared del túnel para un posicionamiento seguro de la herramienta de inspección con el sensor de ultrasonidos.

### 3.1.7. Controlador Global Inteligente

El Controlador Global Inteligente o Intelligent Global Controller (IGC) asegura trayectorias optimizadas y coherentes para los tres subsistemas (el vehículo, la grúa y el manipulador). El IGC comanda la navegación del robot, identificando cuando

una grieta es detectada, y enviando los comandos necesarios a la grúa y al manipulador para situar la herramienta de inspección en la grieta para realizar las mediciones requeridas.

Para evitar latencias no deseadas en el control de los diferentes subsistemas, el IGC se sitúa en el vehículo para manejar las comunicaciones entre las distintas partes. El software utilizado para la comunicación entre ellas está basado en YARP (Metta et al., 2006) y ROS (Quigley et al., 2009). Los componentes del sistema se conectan a una red local para recibir los comandos del IGC y proporcionar mediciones y su estado.

El IGC recibe una misión desde la Estación de Control en tierra (GCS) y proporciona el protocolo para comandar el sistema con el objetivo de realizar la misión de inspección autónomamente. El IGC actualiza el GCS con el estado de la misión y los datos recogidos.

### 3.1.8. Estación de Control en tierra

La estación de Control en tierra o Ground Control Station (GCS) es un componente software fuera del sistema robótico que está en contacto con él. La Figura 6 muestra la interfaz de usuario de la GCS donde se indica la misión al robot y se proporciona el estado de la misión mientras que el sistema robótico está en el túnel. La comunicación entre el sistema robótico y el GCS es realizado por WiFi.

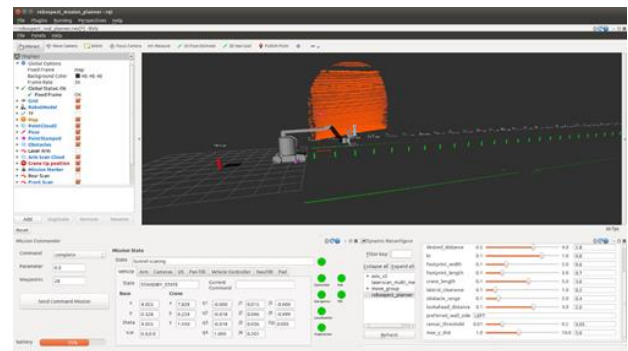


Figura 6. Interfaz de usuario para ordenar las misiones al sistema robótico.

### 3.1.9. Sala de Control

La sala de control o Control Room (CR) es el último componente del sistema de inspección ROBO-SPECT. La CR representa el sitio donde todos los datos recogidos por el robot son procesados. Este procesamiento es realizado por la herramienta software “Structural Assessment Tool (SAT)”, que se encarga de guardar, representar gráficamente y procesar todos los datos de inspección. SAT permite que el usuario final vea los mapas generados del túnel, las secciones 3D escaneadas con el láser e información sobre los diferentes defectos y su posición en el túnel. SAT utiliza todos los datos para generar un informe completo de evaluación del estado estructural del túnel. Además, es capaz de utilizar la información de múltiples inspecciones del mismo túnel para estudiar el grado de deformación o la evolución de las grietas y otros defectos.

## 4. Proceso de Inspección

El proceso de inspección está basado en la división del túnel en secciones. El sistema inspecciona cada sección por completo

y cuando termina avanza hacia la siguiente. El ancho de cada sección depende de las características del túnel y de la misión definida por el usuario. El sistema puede inspeccionar todo el túnel o solamente unas secciones significativas que se indican posicionando marcadores en la interfaz de usuario del GCS. Para demostrar el uso del robot en condiciones reales con tráfico, solo se inspecciona la mitad del túnel dejando libre uno de los carriles.

En cada sección, el sistema robótico comienza en su posición de "HOME" con la grúa y el manipulador recogidos. La detección de defectos se realiza mediante el sistema de visión. Para mantener la resolución deseada la grúa debe situar el sistema de visión a una distancia controlada de la pared del túnel. Gracias al mecanismo pan-tilt para apuntar las cámaras, 2 posiciones de la grúa son necesarias para cubrir la mitad del túnel. En cada uno de estos puntos, las cámaras toman imágenes con diferentes ángulos de tilt proporcionando 9 imágenes en total para inspeccionar la mitad del segmento.

Si una grieta es detectada en una de las imágenes, la grúa posiciona la plataforma cerca de la grieta para que el manipulador alcance la superficie del túnel. Manteniendo la grúa en esta configuración, el brazo posiciona la herramienta de ultrasonidos en la grieta (Figura 7), y una vez tomadas las medidas de la grieta detectada el brazo retira la herramienta de la pared y la grúa vuelve a la posición de escaneo donde se detectó la grieta. Desde esta posición, las cámaras siguen tomando imágenes del resto de la sección y cuando termina, el robot avanza a la siguiente.

Antes de avanzar a la siguiente sección, si una grieta fue detectada, el escáner laser 3D realiza un escaneo completo de la sección. La misión termina cuando todas las secciones han sido inspeccionadas.



Figura 7. Herramienta de inspección con Sensor de Ultrasonidos midiendo una grieta detectada en un túnel.

## 5. Conclusiones

ROBO-SPECT es un sistema altamente complejo capaz de inspeccionar túneles de carreteras autónomamente sin comprometer la seguridad de los operadores y con tráfico en el otro carril. El sistema ha demostrado su robustez trabajando en diferentes modos de operación durante las numerosas pruebas realizadas en túneles. Además, el sistema ha demostrado una alta productividad y reproducibilidad durante las diferentes

pruebas y con condiciones ambientales cambiantes como la temperatura, la luz y el pavimento.

## English Summary

### Robotic System for Tunnel Inspection and structural Assessment

#### Abstract

Tunnel Inspection and maintenance are required to ensure that these infrastructures continue performing correctly. These operations are generally performed manually by expert operators consuming time and without quality control. The inspection and maintenance with automated systems provide a higher productivity, quality and repeatability. This work present the ROBO-SPECT European project inside the 7th Framework Programme (FP7). The overall objective of ROBO-SPECT is to provide an automated, faster and more reliable alternative to manual inspection of tunnels. The project focuses on the design and implementation of a multi-degree-of-freedom robotic system, composed by a vehicle, an extended crane and a high precision robotic arm. A computer vision system to detect tunnel defects and an Ultrasonic Sensor Tool to measure width and depth of detected cracks have been also developed.

#### Keywords:

Automation, tunnel, inspection, maintenance, autonomous control, robots.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto ROBO-SPECT con número 611145 cofinanciado por la comisión europea bajo el séptimo programa marco, el proyecto RoboCity2030-II-CM (S2009/DPI-1559) financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los fondos estructurales de la UE, y el proyecto ARCADIA DPI2010-21047-C02-01 financiado por el proyecto CICYT.

## Referencias

- Balaguer, C., Montero, R., Victores, J.G., Martínez, S., Jardón, A., 2014. Towards Fully Automated Tunnel Inspection: A Survey and Future Trends, en: 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction & Mining (ISARC).
- Bergeson, W., Ernst, S., 2015. Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation (TOMIE) Manual.
- Haack, A., 2002. Current safety issues in traffic tunnels. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 17, 117-127.
- Hertz, K.D., 2003. Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Saf. J.* 38, 103-116.
- Marioli, D., Narduzzi, C., Offelli, C., Petri, D., Sardini, E., Taroni, A., 1992. Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 41, 93-97.
- Metta, G., Fitzpatrick, P., Natale, L., 2006. YARP: yet another robot platform. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 3, 43-48.
- Montero, R., Victores, J.G., Martínez, S., Jardón, A., Balaguer, C., 2015a. Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Autom. Constr.* 59, 99-112.

Montero, R., Vicores, J.G., Menendez, E., Balaguer, C., 2015b. The Robot-Spect EU Project: Autonomous Robotic Tunnel Inspection, en: Robocity2030 13th Workshop EU robotic projects results. pp. 91-100.

Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, A.Y., 2009. ROS: an open-source Robot

Operating System, en: ICRA workshop on open source software.

Vicores, J.G., Martínez, S., Jardón, A., Balaguer, C., 2011. Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration. *Autom. Constr.* 20, 629-636.