

## Simulación de un Sensor de Colisiones para un Brazo Manipulador

### Simulation of a Collision Sensor for a Manipulator Arm

MONTECILLO-PUENTE, Francisco Javier\*†, MEDINA-REZA, Alejandro y LÓPEZ-ENRIQUEZ, Renato

*Instituto Tecnológico Superior de Salvatierra, Manuel Gómez Morín No. 200, Janicho, Salvatierra, Gto. México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Francisco Javier, Montecillo-Puente* / ORC ID: 0000-0001-9540-9228, Researcher ID Thomson: X-2309-2018, CVU CONACYT ID: 50009

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Alejandro, Medina-Reza* / ORC ID: 0000-0003-1890-6292, Researcher ID Thomson: Y-4505-2018, CVU CONACYT ID: 509332

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Renato, López-Enriquez* / ORC ID: 0000-0001-5708-3239, Researcher ID Thomson: Y-4493-2018, CVU CONACYT ID: 954847

Recibido 23 Abril, 2018; Aceptado 30 Junio, 2018

#### Resumen

En este trabajo se presenta la simulación de un sensor para la detección de colisiones para brazos manipuladores. En los sectores Industriales existen instalados gran cantidad de robots manipuladores, así como en algunas instituciones educativas. En ambos casos, los robots generalmente se encuentran en una celda o área de trabajo, donde el robot realiza alguna tarea predefinida. Sin embargo, puede ocurrir el evento en que un objeto en movimiento entre al área de trabajo del robot y ocurra una colisión entre estos. Esto puede ocasionar accidentes graves, en este trabajo se simula un sensor de colisión donde se puede determinar colisiones, se realizan pruebas de cuantos sensores son requeridos y se evalúan los diferentes parámetros del sensor como ruido, velocidad de respuesta. Para mostrar, determinar los parámetros del sensor se simula el sensor en varios escenarios. La contribución de este trabajo, se enfoca a determinar los parámetros que debe cumplir el sensor de colisión para garantizar su operatividad en un entorno real.

**Colisiones, Sensores, Geometría Computacional**

#### Abstract

In this work, a sensor simulation for collision detection for a robot manipulator is presented. In the industrial sectors there are installed a large number of robot manipulators, as well as in some educational institutions. In both cases, the robots are usually placed in a cell or workspace where the robot performs a predefined task. However, an undesirable event may occur when a mobile object comes into the robot's workspace, so that a collision is going to occur. This can cause a serious accident. In this work a collision sensor is simulated where collisions can be detected. Additionally, tests are carried out on how many sensors are required and placed on the robot to avoid collisions; the sensor's parameters such as noise, response and rate are evaluated. In order to determine the parameters of the sensor, a grid of sensor is simulated and several cases of study are presented. The contribution of this work focuses on determining the parameters that the collision sensor must meet to guarantee its operation in a real environment.

**Collisions, Sensors, Robot Manipulator, Computational Geometry**

**Citación:** MONTECILLO-PUENTE, Francisco Javier, MEDINA-REZA, Alejandro y LÓPEZ-ENRIQUEZ, Renato. Simulación de un Sensor de Colisiones para un Brazo Manipulador. Revista de Simulación y Laboratorio 2018, 5-15: 18-26.

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: famontecillo@itess.edu.mx)

†Investigador contribuyendo como primer Autor

## Introducción

La robótica ha sido ampliamente desarrollada en las Universidades, laboratorios y centros de investigación hasta encontrar su área de aplicación en la industria automotriz, el ensamblado de partes, la medicina, la aeronáutica, entre otros sectores. Los robots se pueden clasificar en brazos manipuladores, robots móviles, robots con patas y robots acuáticos, (Siciliano & Khatib, 2008). En general, los robots que han encontrado aplicación son los robots manipuladores que deben ser comandados por un operador o programados para realizar alguna tarea predeterminada, normalmente ubicados en un área de trabajo muy controlada.

Los robots industriales carecen de autonomía, por lo que si algún objeto ingresa en su área de trabajo estos podrían colisionar con el robot creando situaciones indeseadas. El robot por si solo no es capaz de determinar si va a colisionar y mucho menos modificar sus movimientos para evitar colisiones. Actualmente, los esfuerzos de la robótica se enfocan en proveer de autonomía a los robots, de manera que puedan realizar su tarea en escenarios complejos y dinámicos, (Fahimi, 2009), (Sam & Lewis 2006). Por ejemplo, tareas donde hay objetos en movimiento y el robot debe ir generando automáticamente sus movimientos dependiendo de la configuración del área de trabajo.

Para un nivel de autonomía aceptable en los robots, se requiere integrar múltiples sensores y componentes de procesamiento tales como: sensores de visión, generadores de movimientos, planificadores de movimiento, planificadores de acciones, detectores de colisiones y toma de decisiones. El objetivo de estos componentes es que el robot tenga las capacidades de percepción, de acción y de control, es decir, que tenga autonomía. La percepción en el robot se refiere a que debe este debe ser capaz de percibir su entorno y en base a esto controlar sus movimientos o planificar sus acciones. Esta capacidad de percepción se consigue utilizando sensores de profundidad, luz estructurada o sensores de visión, (Taylor & Kleeman, 2006). Los sensores de profundidad generalmente emplean un par visual estero para calcular una imagen tridimensional del área de trabajo.

En cambio, la luz estructurada usa un laser que rebota con los objetos y permite igualmente crear una imagen tridimensional. El sensor visión en cambio es una cámara de video que permite capturar imágenes del entorno para identificar objetos de interés. En los tres casos, la información debe ser procesada y analizada para determinar lo que sucede en el entorno. Esta parte es computacionalmente muy demandante ya que deber ser realizada rápidamente y la cantidad de información que se adquiere por los sensores es inmensa.

Uno de los problemas mas difíciles de resolver es la detección de colisiones del robot con su entorno, (Ehmann & Lin, 2001). En particular, este trabajo se enfoca en la simulación y modelado de una red sensores de colisiones que será montado sobre un robot manipulador. La detección de colisiones es un componente muy importante en la generación de autonomía en los robots. El estudio de este trabajo se realiza para determinar la localización de los sensores, determinar sus parámetros, minimizar el ruido y disminuir los falsos positivos.

En la literatura, para la determinación de colisiones se utilizan miles de comparaciones entre las primitivas geométricas que forman el modelo geométrico del robot y las primitivas del modelo geométrico del entorno, (Figueiredo et al, 2010). Con el sensor propuesto no requeriría de tal carga computacional, sin embargo como la malla de sensores es simulada todo nuestro estudio se realiza en un entorno virtual.

El artículo se estructura de la siguiente forma: 1) en la siguiente sección se desarrolla el modelo teórico de la malla de sensores de colisión y su parámetros; luego, 2) parámetros del sensor y sus primitivas de colisión son discutidas; posteriormente, 3) se presenta el escenario de pruebas experimentales para la malla de sensores y el robot manipulador; y finalmente, 4) los resultados y conclusiones finales son presentadas.

## Modelo teórico de la malla de sensores de colisión

En robótica la información de profundidad o distancia se adquiere de cámaras o sensores de distancia. La dificultad con las cámaras es la dificultad y el tiempo requerido para extraer tal información a partir de las imágenes.

En cambio, existen sensores que facilitan la extracción de dicha información utilizando algún principio físico. La propagación de las ondas de luz y las ondas acústicas son el tipo de ondas que mas se utilizan para este fin, (Espiau, 1988). Un sensor de distancia se compone de dos partes un emisor que emite una onda y un receptor que recibe la onda reflejada, Figura 1.

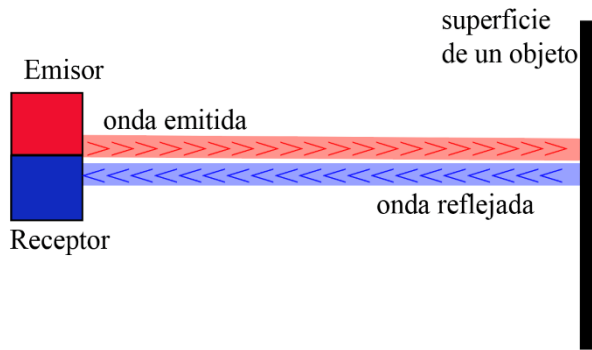


Figura 1 Modelo simplificado del sensor de distancia basado en el principio de propagación de ondas

Para detectar la distancia se utilizan dos principios físicos: 1) detección basada en el principio de tiempo de vuelo de ondas utilizada por sensores ultrasónicos y localizadores laser; ; 2) detección basada en el principio de reflexión de ondas que se utilizan en sensores infrarrojos y laser; (Sanz-Cortielia, 2011), (Burguera et al., 2009), (Sillion & Puech, 1994), (France et al., 1999).

El emisor produce una onda que se propaga en el medio ambiente, si la onda encuentra un obstáculo ésta se refleja en una dirección que depende de la posición y superficie del objeto sobre la que incide la onda emitida. Las superficies de los objetos reflejan la onda en muchas ondas de baja energía en todas direcciones (manera difusa) y/o en una onda con dirección espejo de alta dirección.

Las ondas en el aire pierden su intensidad muy rápido respecto a la distancia, además cuentan con un lóbulo de emisión que depende de la frecuencia, Figura 2. Para simular varios efectos que existen en el ambiente en una situación real se agrega ruido a la medición de distancia exacta.

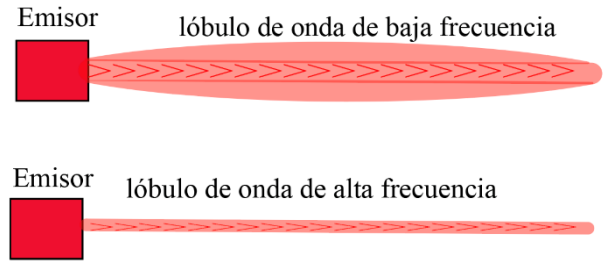


Figura 2 Forma del lóbulo de la onda emitida

Sensor ultrasónico

El emisor del sensor ultrasónico envía un tren de pulsos, y el tiempo de vuelo de estos es utilizado para determinar la distancia. Para simplificar el modelo del sensor ultrasónico utilizamos sensores de alta frecuencia en el rango de 100-400 kHz. Por lo que podemos asumir que los objetos tienen un superficie espejo y que la onda se recibe cuando hay un ángulo de incidencia de -12° a 12° con el obstáculo.

Los parámetros del sensor ultrasónico son: tamaño, distancia mínima, distancia máxima, ángulo de incidencia en el objeto y el ruido gaussiano, Tabla 1. Para los sensores ultrasónicos el tamaño le asignamos 0.05m x 0.05 m x 0.05 m, su distancia mínima de detección 0.5 m, la distancia máxima de detección 1.0 m y se usar ruido gaussiano.

Descripción	Parámetro
Tamaño:	W:ancho x H:alto x D:profundo
Distancia mínima:	$d_{min}$
Distancia máxima:	$d_{max}$
Distancia	$[d_{min}, d_{max}]$
Rango de incidencia:	$[-\alpha_{min}, \alpha_{max}]$
Ruido Gaussiano:	$GN(\sigma, m)$

Tabla 1 Parámetros del sensor ultrasonido

La distancia del sensor simulada se calcula utilizando:

$$d_r = \begin{cases} d \times (1 + GN) & d \in [d_{min}, d_{max}] \& a \in [a_{min}, a_{max}] \\ d_{max} & \text{otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

donde  $d$  y  $d_r$  son la distancia exacta del sensor al objeto y la distancia real simulada, respectivamente.

Localizador laser ( laser range finder)

Los localizadores laser dificultan la medición debido a que tienen ondas de alta frecuencia, esto es el tiempo de vuelo de la onda es muy corto. Por lo que la onda se modula y el sensor mide el cambio de fase, la medición de distancia es una función del cambio de fase entre la onda emitida y reflejada. El rango de incidencia para el localizador se puede suponer de  $-45^\circ$  a  $45^\circ$ . El localizador laser cuenta con los mismo parámetros que el sensor ultrasónico pero con diferentes valores. El tamaño es de  $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$ , la distancia mínima de  $0.05\text{ m}$ , la distancia máxima de  $2.0\text{ m}$ , y se usa ruido gaussiano.

Sensores basados en reflexión

Este tipo de sensores utilizan ondas infrarrojas o laser y reflexión de ondas para determinar distancias, lo que produce luz difusa intensa. Para modelarla utilizamos,

$$s = \frac{(d_{\min} - d)}{d^2} \cos^2 \alpha (1 + GN) \quad (2)$$

donde  $s$  es la señal reflejada difusa, el resto de los parámetros se definen igual que los sensores anteriores. Los parámetros para este tipo de sensor se asignan para el tamaño  $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$ , su distancia mínima de detección  $0.05\text{ m}$ , la distancia máxima de detección  $1.0\text{ m}$ , ángulo de incidencia de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  y el ruido gaussiano con varianza  $0.01$  y media cero. Para simular la distancia al objeto, si  $d \in [d_{\min}, d_{\max}]$  y  $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$  entonces la distancia simulada se calcula como,

$$d_r = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4s d_{\max}}}{2s} \quad (3)$$

y  $d_{\max}$  en otro caso.

Malla de sensores

La malla de sensores es una regilla flexible como la que se muestra en la Figura 3, donde los parámetros a considerar son la cantidad de sensores, la distribución de los sensores y el espaciado entre estos.

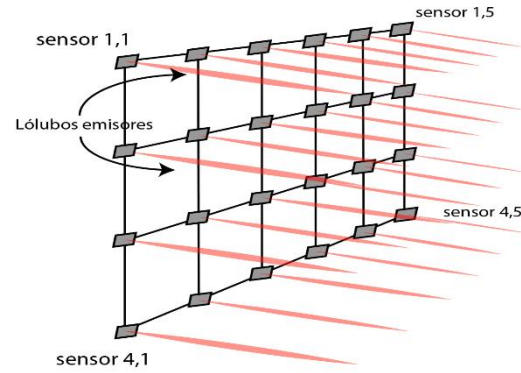


Figura 3 Red de sensores para detección de colisiones, se muestra su configuración y sus lóbulos emisores

Determinación de los parámetros del modelo del sensor y primitivas de colisión

Para simular el sensor se utilizan primitivas geométricas tales como segmentos de línea, cuadrilateros y triángulos. Además, se usan operaciones para calcular la distancia mas corta entre diferentes primitivas, (Eberly, 2000), (Ehmann, 2001), (Ericson, 2005), (Möller, 1997), (van den Bergen, 2004). El lóbulo de la onda es representado por un segmento de línea dirigido y para determinar las distancia exacta  $d$  de contacto se aplican pruebas entre el segmento y primitivas básicas, Figura 4.

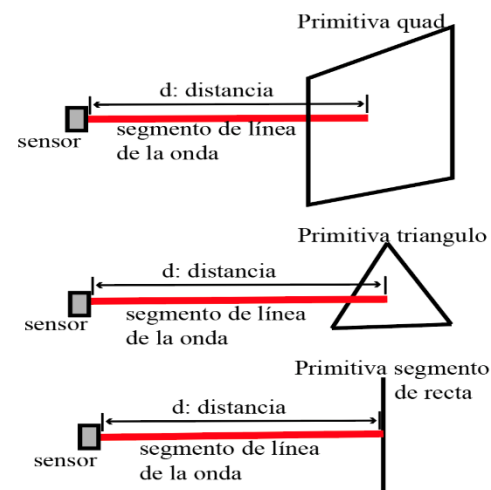
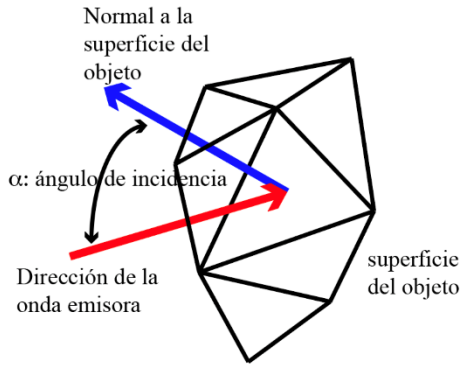


Figura 4 Primitivas básicas de contacto.

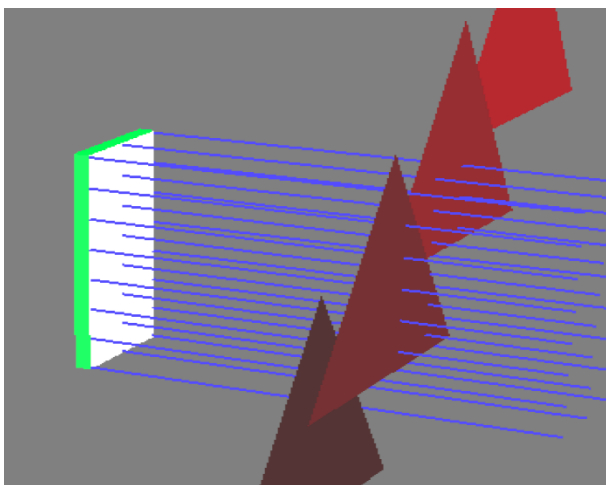
El ángulo de incidencia es un parámetro que es empleado en el modelo de simulación del sensor. Este se define como el ángulo que hay entre el vector de orientación del segmento de línea y el vector normal de la primitiva de contacto de la superficie del objeto, Figura 5.



**Figura 5** Determinación del ángulo de incidencia

### Escenario de pruebas experimentales de la malla de sensores

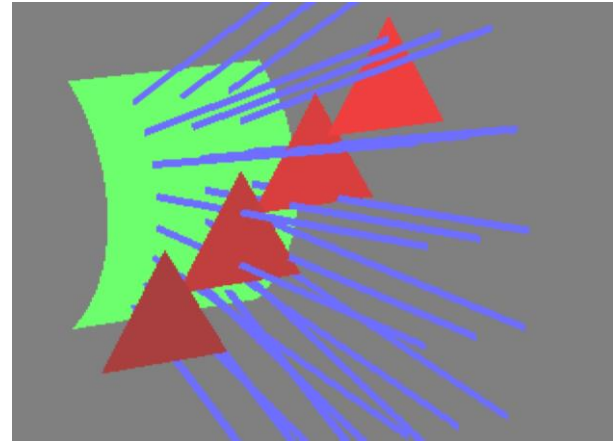
Los escenarios que se describen son una simulación del sensor bajo diferentes configuraciones. En un primer escenario se supone una malla fija rectangular donde los sensores se colocaran. Luego, un objeto se mueve alrededor de la zona de trabajo entrando y saliendo de la región de contacto como se muestra en la Figura 6. Los parámetros a considerar son la cantidad de sensores (su separación), la cantidad de puntos de contacto con el objeto y el tamaño del objeto. En este escenario, la trayectoria de movimiento del objeto está predefinida para evaluar diferentes variaciones del escenario y el tamaño de la rejilla se mantiene fija.



**Figura 6** Escenario 1: malla de sensores de colisión y un objeto en movimiento

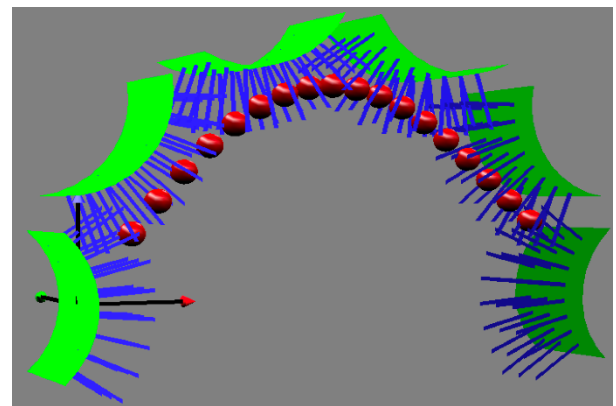
En un segundo escenario se supone una segunda malla fija rectangular flexionada en forma circular. Donde, un objeto se mueve alrededor de la zona de contacto, Figura 7. Los parámetros a considerar son la cantidad de sensores (su separación), la cantidad de puntos de contacto, tamaño del objeto y el radio de curvatura de la superficie de la malla.

Como se puede observar las ondas emisoras se separan entre sí según del radio de curvatura.



**Figura 7** Escenario 2: malla curva con sensores y un objeto en movimiento. Se puede observar como el espacio entre los lóbulos se incrementa conforme se aleja de la malla

El tercer escenario se utiliza la misma malla del segundo escenario, sin embargo ahora se mueve tanto el objeto como la malla, Figura 8. Este escenario tiene como objetivo determinar la viabilidad de la malla de sensores para la detección de colisiones.



**Figura 8** Escenario 3 malla en movimiento y objeto en movimiento

### Resultados

Para todos los resultados se utilizó una laptop MacBook Pro con procesador Intel Core i5 a 2.3 GHz, 8GB de memoria RAM a 2133 MHz LPDDR3 y con tarjeta gráfica Intel Iris 640 1536 MB. Para crear el entorno de simulación se utilizó el lenguaje c++, se creó una librería con primitivas de colisión (Ericson, 2005), para los gráficos se OpenGL y GLUT fue utilizado (Shreiner et al., 2008) y como herramientas adicionales la librería ublas junto con numeric-bindings para operaciones vectoriales, (Walter, 2000), (Klößner, 2018).



Las curvas de distancia para los sensores ultrasónicos, localizador laser y sensor basado en reflectancia se determinaron simulando un sensor de distancia y un objeto en forma de triangulo Figura 9. El objeto tiene movimiento de traslación y rotación para poder medir distancia máxima y ángulo de incidencia del sensor.

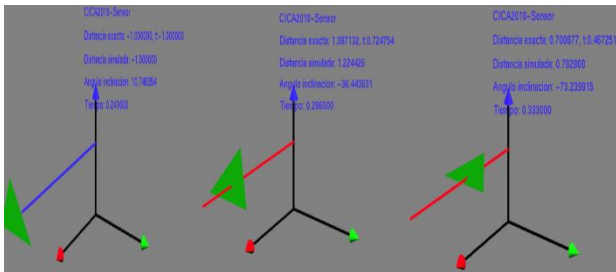


Figura 9 Simulación del sensor de distancia, el laser se muestra en rojo cuando detecta un objeto y en azul cuando no

Los perfiles para cada sensor se muestran en el Grafico 1, donde se identifica que el sensor ultrasónico es el menos eficiente y el sensor basado en reflectancia tiene un mejor desempeño respecto al ángulo de incidencia con el objeto. Ruido Gaussiano con media cero y desviación estándar 0.1 fue agregado a la medición geométrica para simular el entorno real, la distancia de detección máxima de 1.5 m.

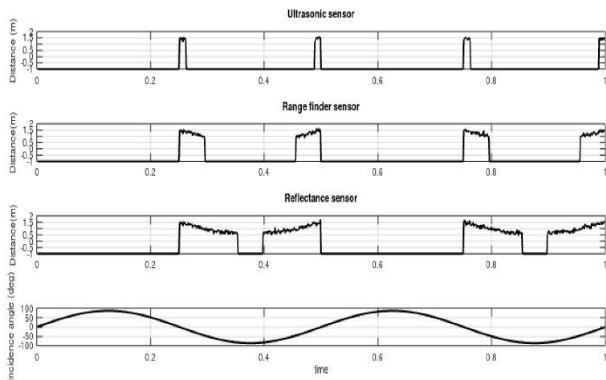


Grafico 1 Curvas de distancia de los sensores y el movimiento rotacional del objeto

Escenario 1 de malla plana de sensores

En este escenario se varía la cantidad de sensores y el tamaño del objeto. Para la malla de sensores se definen tres tamaños: 2x4 sensores, 3x8 sensores y 6x10 sensores; para el tamaño del objeto un triangulo (base x altura) también se definen tres tamaños: 0.333 m x 0.133 m , 0.5 m x 0.2 m y 0.75 m x 0.3 m. En el Grafico 2, el tamaño de la malla se fija a 3x8 sensores, el tamaño del objeto varía y se determinan la cantidad de sensores activos o con contacto.

En todos los escenarios se usa un sensor tipo localizador laser ya que es el que tiene el desempeño intermedio. Además, el tamaño de la malla es de 0.4m x 1.0m.

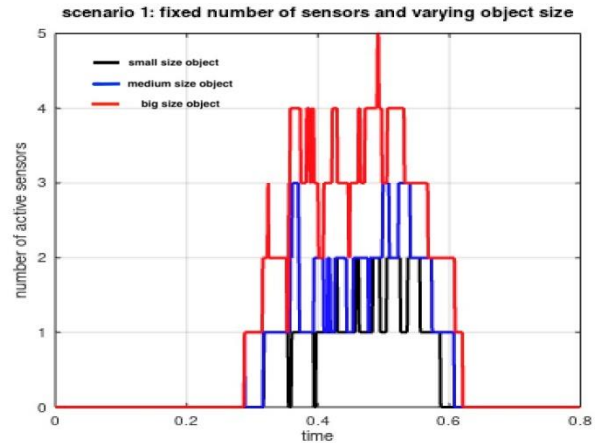


Grafico 2 Para el tamaño de objeto pequeño cantidad máxima de sensores activos simultáneamente es 2, para el tamaño mediano es 3 y para el tamaño grande 5. Con el objeto grande la detección inicia primero

Luego, en el Gráfico 2 se deja fijo el tamaño del objeto a 0.5 m x 0.2 m y se varía la malla. Para diferentes tamaños la malla de 2x4 la cantidad máxima de sensores activos simultáneamente es 1, para la 3x8 es 3 y 7 para la de 6x10. Con la malla mas grande la detección inicia primero y con la malla pequeña se detecta el objeto solo una vez.

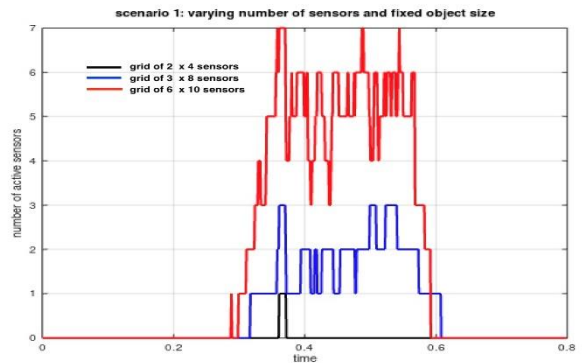
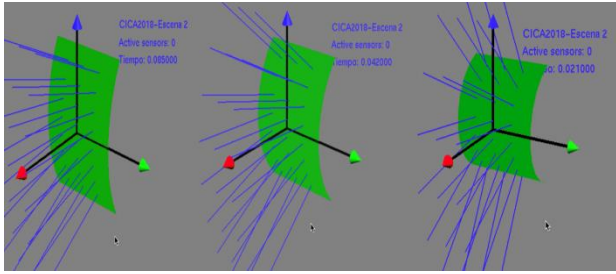


Grafico 3 Cantidad de sensores activos simultáneamente para varios tamaños de malla.

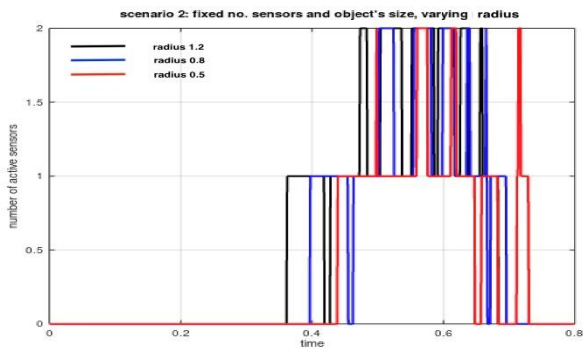
Escenario 2 de malla curva de sensores

Para este escenario se varían tres parámetros: el tamaño del objeto (igual que el escenario 1), la malla (como en el escenario 2) y el radio de curvatura de la malla. Los valores del radio de curvatura son 1.2 m, 0.8 m y 0.5 m; si el valor grande la superficie es plana y se curva según disminuye su valor, Figura 10. El tamaño de la malla es de 0.4 m x 1.0 m.



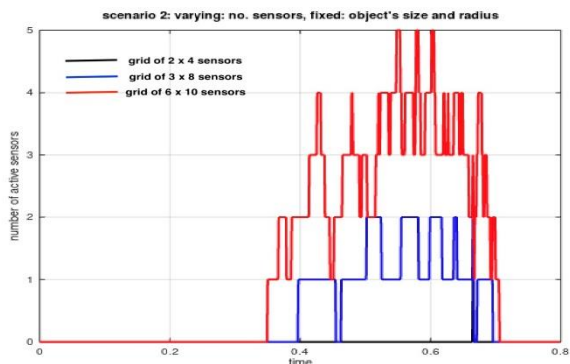
**Figura 10** Radio de curvatura de la superficie de izquierda a derecha: 1.2 m, 0.8m y 0.5 m

Los resultados de variar el radio de curvatura y mantener fijo la malla a 3x8 y el objeto a tamaño medio se muestran en el Gráfico 4. Se puede observar que si bien la cantidad de sensores detectados simultáneamente es baja, el tiempo en el que al menos un sensor esta activo es considerable en las tres variaciones.



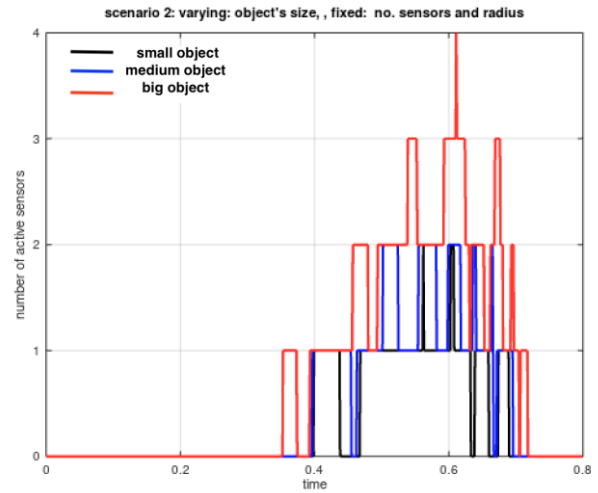
**Gráfico 4** Para diferentes radios de curvatura la cantidad máxima de sensores activos simultáneamente es de dos y en ocasiones cero después de haber sido detectado

Ahora, manteniendo el tamaño del objeto a mediano, la curvatura en 0.8 m y variando la cantidad de sensores se obtiene el Gráfico 5. Del grafico podemos determinar que la cantidad de sensores requeridos en superficies curvas debe de incrementarse para tener una buena detección.



**Gráfico 5** En el caso de la malla de 2x4 solo se activa un sensor y por un corto lapso de tiempo, en contraste para la malla de 6x10 se obtienen hasta 5 sensores activos simultáneamente

El Grafico 6, muestra la cantidad de sensores activos con variación del tamaño del objeto y manteniendo fijo el radio a 0.8m y la malla a 3x8. La cantidad de sensores activos simultáneamente para los objetos pequeños y medianos es de dos, sin embargo para objetos medianos el lapso de tiempo con detección es mayor.

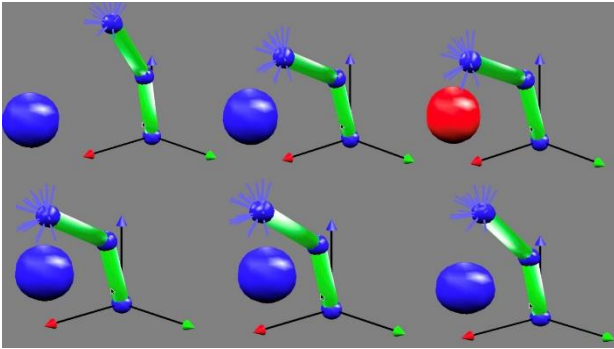


**Gráfico 6** Para este caso si el objeto es grande la cantidad de máxima de sensores activos simultáneamente es de cuatro

*Escenario 3 malla de sensores y objeto móvil*

Para este escenario se modelo un robot de dos grados de libertad, con segmentos cilíndricos de 0.7m, sobre el efector final se monto una malla esférica de 20 sensores de radio 0.1m colocados aleatoriamente y se incluyo un objeto esférico en movimiento de radio 0.25 m. En esta demostración, el robot manipulador se programo para que realiza una trayectoria y en caso de que detectar un objeto cercano este realiza un movimiento de evasión de colisión.

Una secuencia de imágenes demostrando este escenario es presentado en la Figura 11. La esfera se cambia de color a rojo cuando el objeto entra en contacto con los sensores del robot, en el efector final se muestran los sensores de colisión, para este caso la distancia de detección se fijo a 0.25 m. Para una situación real, sensores deben de colocarse sobre toda la superficie del robot ya que los objetos pueden colisionar con cualquier parte. Sin embargo, se debe tener cuidado en donde colocar los sensores y en que cantidad para no afectar el área de movimiento del robot.



**Figura 11** Secuencia de imágenes mostrando la funcionalidad de la malla de sensores para la evasión de colisiones

## Conclusiones

En este trabajo se presentó el modelado de una malla de sensores de colisión, se presentaron sus curvas típicas, se realizaron pruebas sobre mallas planas y curvas, y finalmente se mostró su viabilidad en una demostración con un robot de dos grados de libertad. Para la detección de colisiones el sensor de distancia puede ser una excelente alternativa ya que es muy rápido ya que toma  $0.01\mu s$  en realizar 10 pruebas de colisión. En un escenario de aplicación como una celda robótica, la parte complicada y con demanda computacional importante es el modelado tridimensional.

Sobre la configuración de la malla es importante considerar la superficie sobre la cual será montada y el tamaño de los objetos con los que interactuara. En el caso de un robot manipulador este cuenta con partes planas y partes curvas, por lo que la cantidad de sensores óptima se debe determinar utilizando los escenarios aquí presentados. Para robots de tamaño pequeños (segmentos de entre 0.5 a 0.7m) las mallas de  $3 \times 8$  sensores es una buena opción tanto para superficies planas y curvas no tan pronunciadas.

Esta malla de sensores puede aplicarse para el desarrollo de ambientes virtuales, realidad aumentada y aplicaciones de interacción robots-humano. Áreas de oportunidad a explorar son el uso de computo paralelo y gpu's de tarjetas gráficas para hacer más eficiente los cálculos de colisión. Así como explorar la posibilidad del desarrollo del sensor como un dispositivo físico. Como sugerencias de utilización del sensor virtual de colisiones aquí desarrollado, se sigue creando un sistema de computo distribuido.

La red distribuida de computo estaría compuesta de tres computadores como mínimo de propósito específico: 1) controlador del robot, 2) computadora para modelado y detección de colisiones (utilizando el sensor aquí presentado), y 3) computadora para la generación de movimiento y toma de decisiones.

## Referencias

Burguera, A., González, Y., & Oliver, G. (2009). *Sonar Sensor Models and Their Application to Mobile Robot Localization*. *Sensors*, 9, 10217-10243.

Eberly, D. (2000). *3D Game Engine Design: A Practical Approach to Real-Time Computer Graphics*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco.

Ehmann, S. & Lin, M. (2001). *Accurate and fast proximity queries between polyhedra using convex surface decomposition*. *Computer Graphics Forum*. 20,500–10.

Espiau, B. (1988). *An Overview of Local Environment Sensing in Robotics Applications*. *Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots*, Springer-Verlag, 43:125–151.

Ericson, C. (2005). *Real-Time Collision Detection*. Morgan Kaufmann Publisher.

Fahimi, F. (2009). *Autonomous Robots, Modeling, Path Planning and Control*. Springer.

France, L., Girault, A., Gaucueal, J-D. & B. Espiau. (1999). *Sensor Modeling for a Walking Robot Simulation*. *Computer Animation and Simulation '99*. Eurographics. Springer.

Figueiredo, M., Oliveira, J., Araújo, B. & Pereira, J. (2010). *An efficient collision detection algorithm for point cloud models*. In 20th International conference on Computer Graphics and Vision, 43:44-51.

Möller, T. (1997). *A Fast Triangle-Triangle Intersection Test*. *ACM Journal of Graphics Tools*.

Sam Ge, S. & Lewis, F.L. (2006). *Autonomous Mobile Robots: Sensing, Control, Decision Making and Applications*. CRC Press.



Sanz-Cortiella, R., Llorens-Calveras, J., Escolà, A., Arnó-Satorra, J., Ribes-Dasi, M., Masip-Vilalta, J., Camp, F., Gràcia-Aguilá, F.,

Solanelles-Batlle, F., Planas-DeMartí, S., Pallejà-Cabré, T., Palacin-Roca, J., Gregorio-Lopez, E., Del-Moral-Martínez, I. & Rosell-Polo R. (2011). *Innovative LIDAR 3D Dynamic Measurement System to Estimate Fruit-Tree Leaf Area*. Sensors.

Shreiner, D., Woo, M., Neider, J. & Davis, T. (2008). *OpenGL Programming Guide Version 2.1*. Addison-Wesley.

Siciliano, B. & Khatib, O. (2008). *Handbook of Robotics*. Springer.

Sillion, F. & Puech, C. (1994). *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publish.

Taylor, G. & Kleeman, L. (2006). *Visual Perception and Robotic Manipulation 3D Object Recognition, Tracking and Hand-Eye Coordination*. Springer.

Walter J., Kock, M., Gunter, W., & Bellot, D. (2000). *Basic Linear Algebra Library*. Recuperado de : [https://www.boost.org/doc/libs/1\\_65\\_1/libs/numeric/ublas/](https://www.boost.org/doc/libs/1_65_1/libs/numeric/ublas/)

Klößner, A. (2018) *Numeric Library Bindings for Boost UBlas*, Recuperado de: <https://mathematician.de/software/boost-numeric-bindings/>

van den Bergen, G. (2004). *Collision detection in interactive 3D environments*. Morgan Kaufmann Publish.