

SICK AG WHITEPAPER

FUNCIONAMIENTO Y VARIANTES DE LOS SENSORES LiDAR

2018-07

AUTOR

Harald Weber
Head of Product Unit Ranging LiDAR sensors
de SICK AG en Waldkirch (Alemania)

RESUMEN

En este documento se tratan las múltiples aplicaciones de LiDAR. Los sensores LiDAR, en sus variantes 1D, 2D o 3D, se utilizan en la producción industrial, sistemas de tráfico y entornos logísticos en todo el mundo. Como consecuencia del aumento de la automatización y la creciente expansión de los sistemas de transporte sin conductor, ya en el futuro próximo cobrarán cada vez más importancia en ámbitos como la seguridad funcional y la detección sin contacto y la evaluación de objetos. Entre los productos más recientes LiDAR se cuentan, por ejemplo, las gamas de sensores Dx1000, TiMxxx, MRS1000, MRS6000 o NAV de SICK. Éstos complementan el programa formado por LMS1xx, LMS5xx, LD-MRS y LD-LRS.

Índice

¿Qué significa LiDAR?	2
Los sensores LiDAR en sus variantes 1D, 2D o 3D	2
Medición con láser – diferentes métodos de medición	4
Método de medición con los sensores 1D, 2D o 3D	9

Introducción

Los sensores LiDAR se utilizan en la industria de todo el mundo, desde hace décadas. Estos sensores protegen a las personas y permiten realizar procesos automatizados. Esto es así tanto en interior como en exterior. La automatización de puertos, los sistemas de gestión del tráfico o las instalaciones de protección de objetos son solo algunos ejemplos de campos de aplicación. A continuación se explica el funcionamiento básico de las diferentes variantes de LiDAR. Además, existen ejemplos seleccionados de posibilidades de aplicación de los escáneres láser sin contacto, con frecuencia invisibles. Estos ejemplos muestran la importancia de las aplicaciones de LiDAR para la Industria 4.0.

¿Qué significa LiDAR?

Los sensores cuyo funcionamiento se basa en la medición de la distancia sin contacto mediante láser son ya actualmente fundamentales para el mundo de la automatización. Este desarrollo comenzó como la llamada técnica de medición TOF. TOF (Time of Flight), tiempo de vuelo del haz luminoso, se reemplaza normalmente por términos más precisos como LADAR o por el más utilizado LiDAR. LADAR (Laser Detection and Ranging) o LiDAR (Light Detection and Ranging) se basan conscientemente en el popularmente utilizado RADAR, que significa Radio Detection and Ranging.

Los sensores LiDAR en sus variantes 1D, 2D o 3D

En su versión más simple, los sensores LiDAR se usan en medidores de distancias y sensores como sistemas de medición de distancia puntuales. Para la medición directa de la distancia se apuntan hacia un objetivo natural o un reflector. Los sensores que funcionan sobre esta base en una dimensión (distancia) son los llamados sensores unidimensionales, es decir, 1D.

Si se mueve el haz de medición o gira en un nivel, se obtiene una expresión sobre la distancia y el ángulo, es decir, en dos dimensiones. Los sensores utilizados para una medición de este tipo se denominan, normalmente, como escáner láser 2D o sensores 2D-LiDAR. Calculan valores medidos en un orden secuencial, normalmente, con el mismo intervalo entre las mediciones.

Con los sensores LiDAR se trabaja en la tercera dimensión, cuando se giran. Se obtiene tanto información sobre la distancia y posición en la dirección x, así como sobre las posiciones en la dirección y así como z. Se obtiene la misma información sobre los diferentes parámetros espaciales, cuando varios sistemas de emisión o recepción se mueven explorando en diferentes ángulos horizontales en un sensor. Actualmente, esto se denomina escáner multiposición.

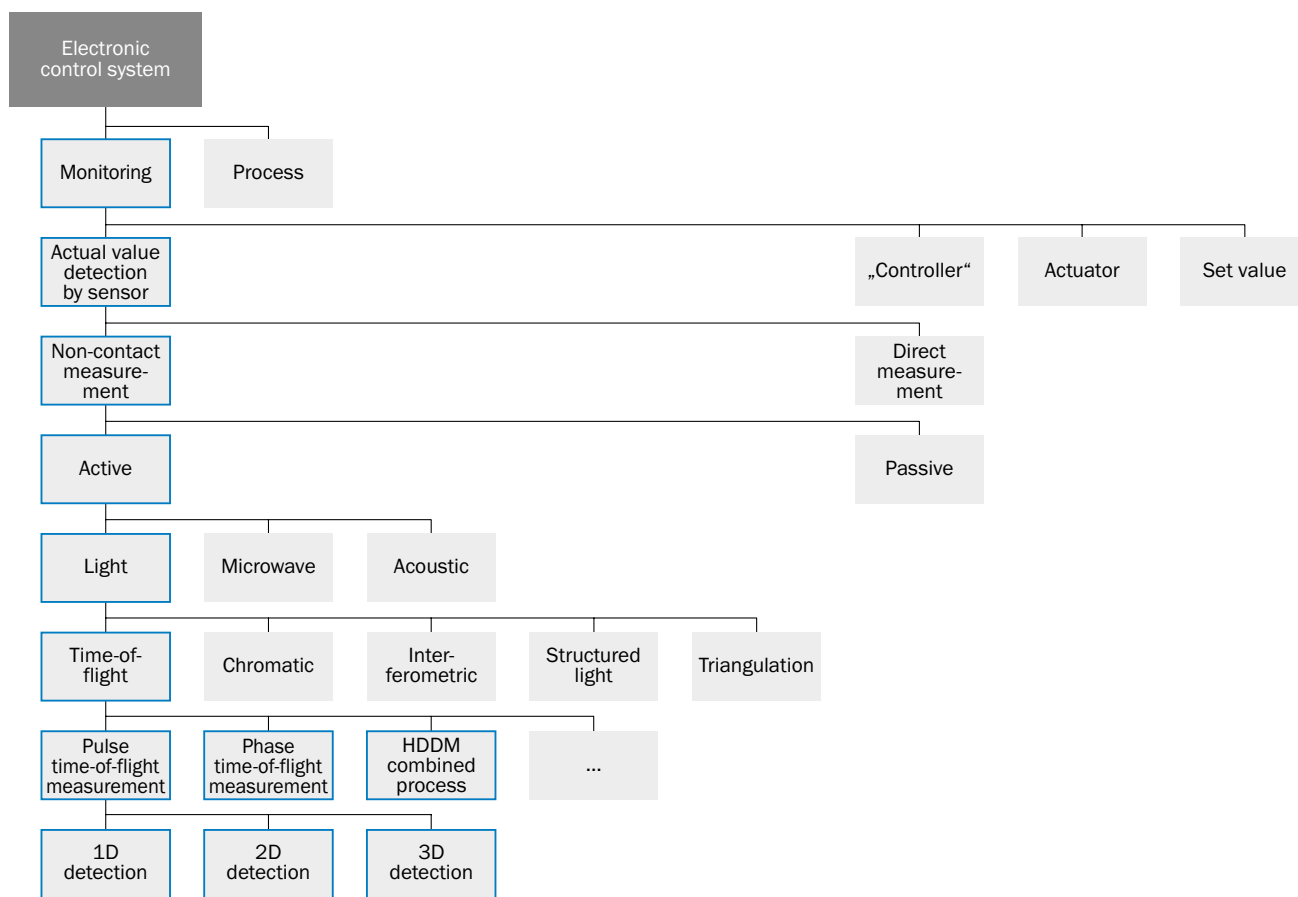


Fig. 1: Montaje estructural del circuito electrónico de regulación

Los sensores LiDAR se utilizan, como mínimo, en circuitos de regulación industriales clásicos. El uso de sensores basados en LiDAR en aplicaciones de aseguramiento de la calidad se trata en otro lugar.

Circuito de regulación

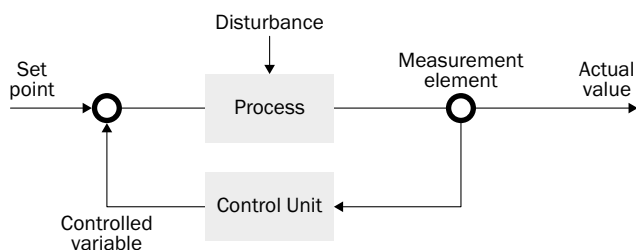


Fig. 2: Esquema de conexiones del circuito de regulación

En el circuito de regulación clásico, los sensores LiDAR ofrecen la ventaja de que registran sin contacto el valor real, por medio del elemento de medición, en la salida del proceso de trabajo. En un método de medición sin contacto cumplen el requisito de no ejercer ninguna presión mecánica ni de otro tipo sobre el objeto de medición. De este modo es posible un proceso de reacción y para el bucle del circuito de regulación siguiente se facilita un resultado de medición fiable y comprensible.

Medición con láser – diferentes métodos de medición

Utilizar un láser significa iluminar activamente el objeto de medición. Con una iluminación activa, en cualquier situación de medición puede aprovecharse la ventaja de que el receptor del sensor se adapte a la fuente de emisión. El sensor puede utilizarse independientemente de las fuentes de luz externas y puede usarse por la noche, bajo tierra, en túneles, etc. con la misma eficiencia que en exterior o con luz artificial.

El uso concentrado y coherente de la luz de un láser comporta otras ventajas. Por ejemplo, la señal de emisión para registrar un objeto puede delimitarse espacialmente de forma precisa. Para ello es importante que los sensores sean seguros para la visión directa y cumplan con las disposiciones legales respectivas para las potencias de emisión permitidas. El enfoque de los láseres de emisión no permite en el campo 2D y 3D resoluciones finas para explorar objetos a gran distancia o con estructuras finas.

Para la medición con láseres como fuente de emisión se usa un elemento de recepción apropiado. Los emisores y receptores, así como la unidad de evaluación con una alta resolución temporal son el núcleo del sensor LiDAR. Los circuitos electrónicos siguientes son relevantes para el uso de los datos de medición obtenidos. Aquí, los datos se utilizan para la alineación mecánica de las unidades de emisión y recepción y la adaptación técnica relevante de la potencia respecto a la aplicación del sensor.

Un método de medición sin contacto requiere que el objeto de medición pueda registrarse físicamente según el principio de medición del sensor. Para el uso del láser esto significa una radiación del láser sin interferencias hacia y desde el objeto en la “línea de visión” directa. Existe una gran ventaja de la medición láser sin contacto y es que funciona casi con cualquier tipo de naturaleza del objeto de medición. Esto permite una variedad de posibilidades de aplicación del registro sin contacto mediante láser en el mundo industrial. Los sensores de medición basados en láser se usan, por ejemplo, en la logística, para procesos de transporte, para el registro de flujos circulatorios en el tráfico vial o la automatización de procesos de carga y descarga en contenedores en puertos.

La potencia luminosa reflectante de un impulso láser depende directamente de la distancia y la naturaleza del objeto de medición. Mediante la propagación plana, en ángulo recto, del impulso láser en la dirección de emisión, la divergencia, se irradia menos potencia luminosa sobre el objeto, dependiendo de la distancia, por unidad superficial. Para la luz reflejada se aplican las mismas condiciones de propagación. Las superficies a observar tampoco están necesariamente alineadas, de modo que toda la luz reflejada se refleja en dirección al sensor. Normalmente, solo una fracción de la luz reflejada llega al receptor del sensor LiDAR.

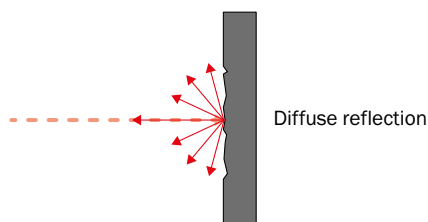


Fig. 3: Reflexión del haz luminoso en la superficie del objeto

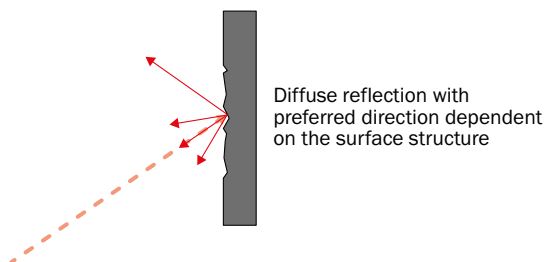


Fig. 4: Ángulo de reflexión

La reflexión en el objeto depende directamente de la naturaleza del mismo. Esto describe la denominada reflectancia. El brillo y la característica de reflexión del objeto determinan este valor. La reflectancia se indica en porcentaje, según la tabla estándar de Kodak. La hulla tiene una reflectancia de un 5 % aprox., el cuero negro mate del calzado un 10 % aprox., una pared de yeso blanca un 90 % aprox. Los retrorreflectores que reflejan la luz en dirección a la fuente de radiación logran valores de reflectancia de hasta el 10.000 %, la lámina de reflexión todavía 3.000 %. Las características de reflexión de los objetos, que lo detectan tanto directamente delante del sensor, como también a grandes distancias, constituyen un desafío respecto a la dinámica del receptor del sensor. Mediante la coordinación del transmisor láser, la energía del impulso y la sensibilidad del receptor, los sensores LiDAR pueden medir también objetos a gran distancia con baja reflectancia.

En la medición de distancia con láseres se registra por vía directa la distancia más corta entre el objeto y el sensor. Esto es una gran ventaja, ya que en la medición con la velocidad de la luz no se puede obtener una desviación adicional y, con ello, ningún “aumento” adicional. Sin embargo, en algunos pocos casos de aplicación es también un inconveniente. La medición de objetos que están colocados detrás de un vidrio o embalaje de lámina puede ser difícil. Los sensores LiDAR no “miran” a la vuelta de la esquina y, normalmente, tampoco a través de los objetos, aunque sea conveniente para el tipo de aplicación. Los objetos transparentes son, en la mayoría de los casos, la causa de las interferencias en el valor medido, pero en la aplicación se filtran fiablemente, con frecuencia, por ejemplo, mediante la tecnología Multi-Echo.

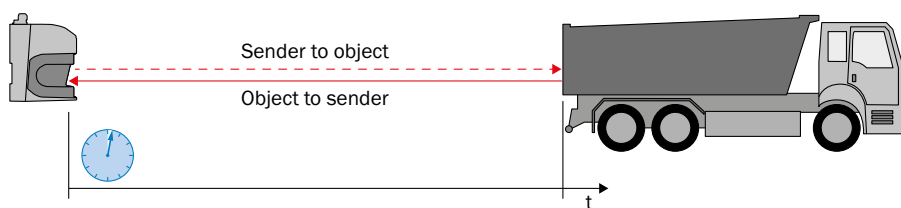


Fig. 5: Medición de la distancia con medición del tiempo de propagación del impulso

La selección del método de medición apropiado optimiza el sensor LiDAR para la aplicación respectiva.

Método de medición por correlación de fases

El método de correlación de fases se describe también en el libro blanco HDDM* (8022026). Éste es el método de medición de distancia clásico. Para ello se aplica una señal con una determinada frecuencia a un haz láser continuo. La diferencia de tiempo de propagación de las fases entre el haz de emisión y el de recepción se registra en el receptor y se evalúa en la unidad de evaluación. La diferencia de fases se correlaciona con la distancia entre sensor y objeto. Un inconveniente sistemático de este método es que la medición de la diferencia de fases, después de una diferencia de fases de más de 360° , no admite una expresión inequívoca de la distancia. Aquí se habla también de un rango de claridad de $< 360^\circ$. Una solución en los sistemas unidimensionales son los sensores que conmutan diferentes frecuencias de distinta longitud de onda y mediante la comparación lógica de los valores medidos alcanzan un gran alcance y, además, una gran exactitud de medición.

Método de medición del tiempo de propagación del impulso

El método de tiempo de propagación de impulsos ha llevado al éxito de los sensores LiDAR para alcances de hasta varios cientos de metros. Existen sensores que por medio de un contador de tiempos de vuelo del haz luminoso pueden trabajar con una resolución de pocos centímetros. El método de tiempo de propagación del impulso utiliza el tiempo de propagación puro de un impulso luminoso entre el emisor, el objeto y el receptor. Si un objeto refleja el impulso láser, registra la medición de la distancia más corta entre el objeto y el sensor. Mediante la medición con la velocidad de la luz, los valores medidos con los sensores LiDAR basados en el método de tiempo de propagación del impulso son extraordinariamente robustos y disponibles.

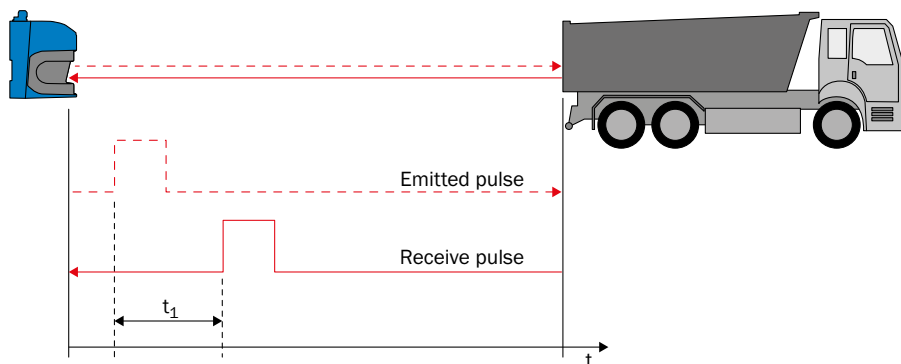


Fig. 6: Principio de funcionamiento de la medición del tiempo de vuelo del haz luminoso

Método de medición HDDM+ (Valoración estadística):

High Definition Distance Measurement Plus (HDDM+) es un método estadístico. Se describe más detalladamente en el libro blanco HDDM+ (8022026). Con este método se utiliza el efecto de múltiples impulsos individuales que se agrupan nuevamente en base a la muestra de envío conocida y, por medio de métodos estadísticos se proporcionan informaciones sobre la distancia y la señal de eco.

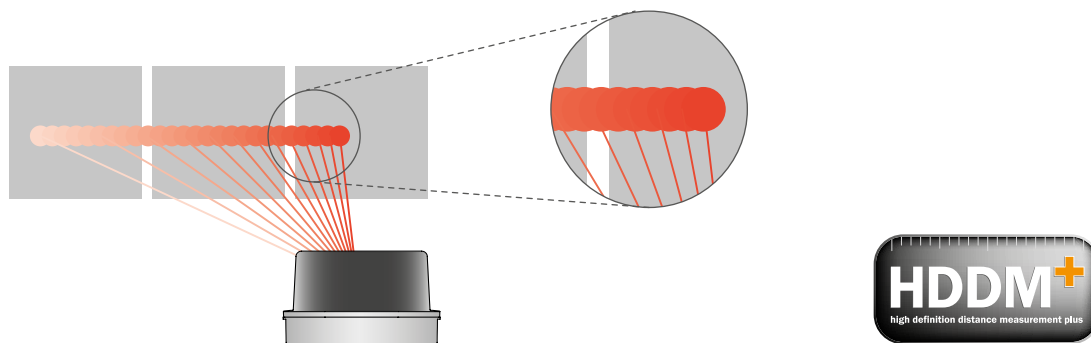


Fig. 7: Ejemplo de exploración sin fisuras del área de exploración con el sensor LiDAR MRS1000 de SICK

Evaluación de varios impulsos de recepción en el haz de medición

Como en la práctica no puede ser un impulso láser infinitamente corto, ni un spot concentrarse infinitamente (pequeño) en la dirección de propagación, se generan efectos físicos que permiten usar los sensores para calcular un valor medido. El efecto más conocido son las señales de eco regresivas, que pueden utilizarse para una evaluación múltiple. Si el punto láser es mayor que el objeto a medir y una parte del punto índice sobre el borde, una parte del impulso luminoso se refleja en la superficie del primer objeto de medición y quizá también en una parte de la superficie que hay detrás. Este efecto es posible varias veces y se realizan otras mediciones. Ahora el objetivo es desarrollar un método que haga viable este aparente efecto de interferencia para la aplicación. El cliente recibe del sensor valores de distancia y de eco a través de los ecos reflectantes en el ángulo respectivo. En los sensores 1D son convenientes hasta ocho ecos y en los sensores de exploración hasta cinco. La salida de varios ecos permite usar sensores LiDAR en exterior. De este modo es posible un filtrado fiable de los valores de medición de interferencia que se producen por la lluvia, la nieve, el polvo o el granizo en el campo de visión.

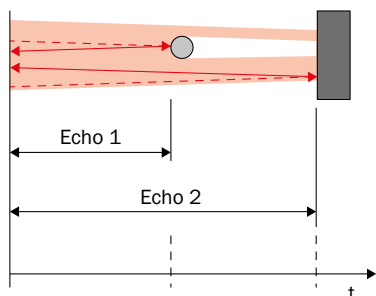


Fig. 8: El objeto es menor que el diámetro del haz láser

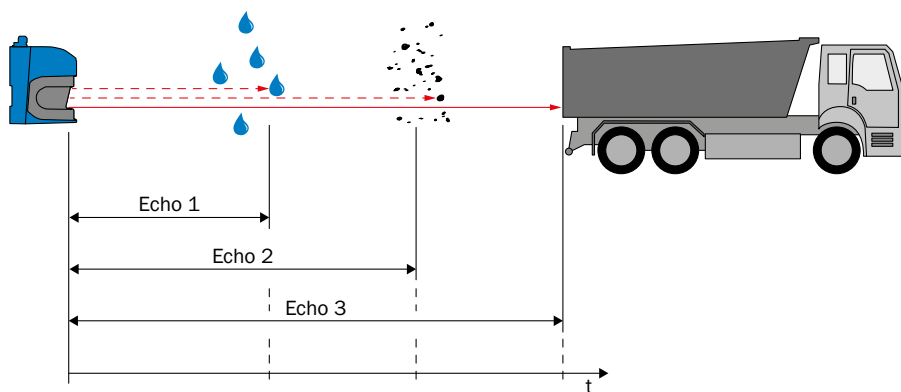


Fig. 9: Efectos de múltiples ecos en el haz de medición

Los sensores LiDAR pueden registrar un valor de medición o en los sistemas Multi-Echo, varios valores de medición con diferentes distancias por paso de ángulo. Este valor medido puede enviarse a la evaluación interna o la salida de datos externos. Si se registra un valor medido en un ángulo, por medio del método de medición del tiempo de propagación del impulso se asegura que hay un objeto en este haz de medición. Si se coloca un sensor LiDAR en vehículos, dos mediciones temporalmente consecutivas no pueden considerarse que sean del mismo objeto. Una valoración de si el valor medido es una parte de la aplicación o debe rechazarse, por ejemplo, debido a una pieza en el campo de visión, debe realizarse en la aplicación posterior. Cuando hay un sensor láser que mide, el usuario tiene la libertad de crear el filtro apropiado para su aplicación. Además, los sensores disponen, con frecuencia, de filtros configurables que pueden conmutarse. Para determinar el momento de medición, las exploraciones de datos de los sensores tienen un sellado de tiempo que puede sincronizarse con fuentes de datos externas.

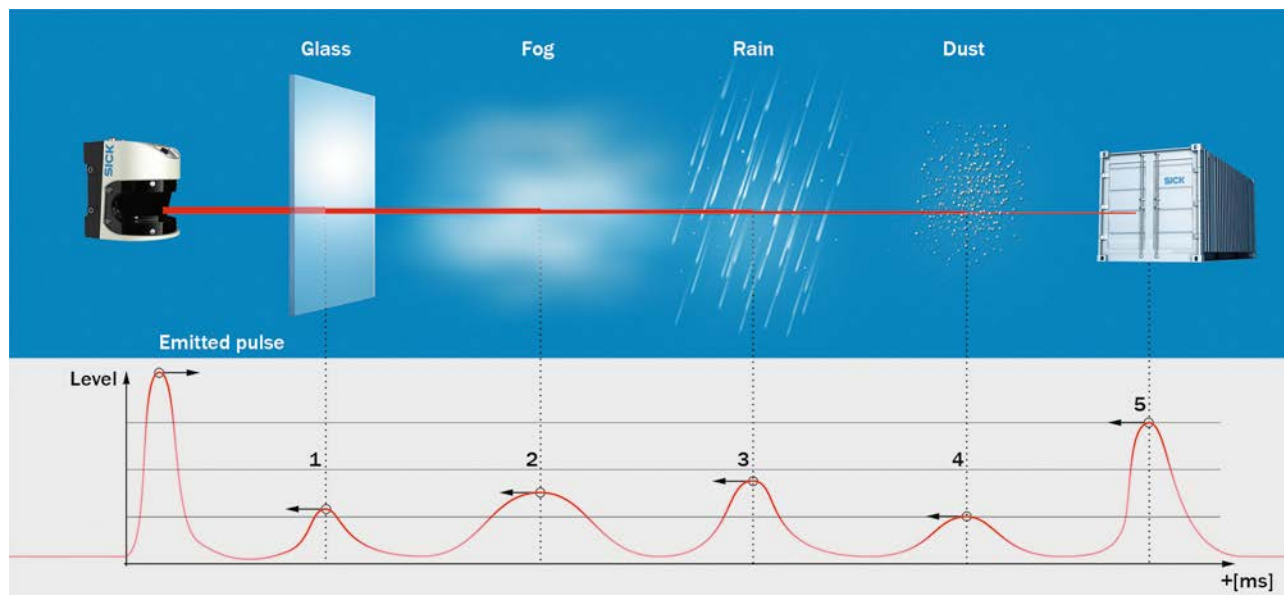


Fig. 10: Análisis Multi-Echo LMS5xx

Método de medición con los sensores 1D, 2D o 3D

Sensores de medición lineal (1D)

Los sensores de distancia como el Dx1000 utilizan la propagación lineal, unidimensional en dirección al objeto de medición, para determinar distancias y modificaciones de la distancia en objetivos naturales (hasta el 100 % de reflectancia) o reflectores. Para ello, en las mediciones pueden lograrse mediciones en reflectores con alcances de hasta 1.500 m (DL1000). Usando sensores de medición lineales pueden realizarse, por ejemplo, posicionamientos de grandes grúas a una distancia precisa, para permitir procesos de agarre y descarga. Una optimización del tiempo de ciclo de medición realizada de acuerdo con la aplicación permite que las grandes distancias y los cambios de distancia rápidos puedan registrarse de forma fiable y extraordinariamente precisa. En las instrucciones de uso del Dx1000 (DE: 8019330, EN: 8019329) – un sensor 1D típico con método de medición moderno – puede obtenerse información más detallada.

Sensores de medición superficial (2D)

El desarrollo de sensores 2D tuvo por objetivo mantener las características destacadas de la medición con láser y usarlas en un sensor que mida en la superficie. El método utilizado aquí de desviar un haz láser por medio de un espejo giratorio parece simple. Sin embargo, sus detalles constituyen un desafío. Muchos sensores de exploración son sistemas de medición coaxial. Para ello, el haz del emisor incide en el centro del haz receptor. Éste se desvía ahora por medio de un espejo giratorio. Todas las características descritas que hacen tan destacada la medición con láser se mantienen, como alcances grandes y la capacidad para la medición también objetos muy oscuros.

En los sensores LiDAR se sincroniza la secuencia final de impulsos láser con la frecuencia de rotación del motor y la resolución angular deseada. Normalmente, la frecuencia de conmutación máxima de la fuente láser y la resolución angular deseada determinan la velocidad de giro del motor. Durante una rotación no pueden generarse más impulsos de los permitidos por la conmutación láser.

En los sensores que exploran destacan también la resolución angular y la fidelidad angular de la secuencia final, así como la alta frecuencia de medición (velocidad de rotación de los motores).

Para la desviación de un haz láser por medio de un espejo es necesaria una alta precisión mecánica.

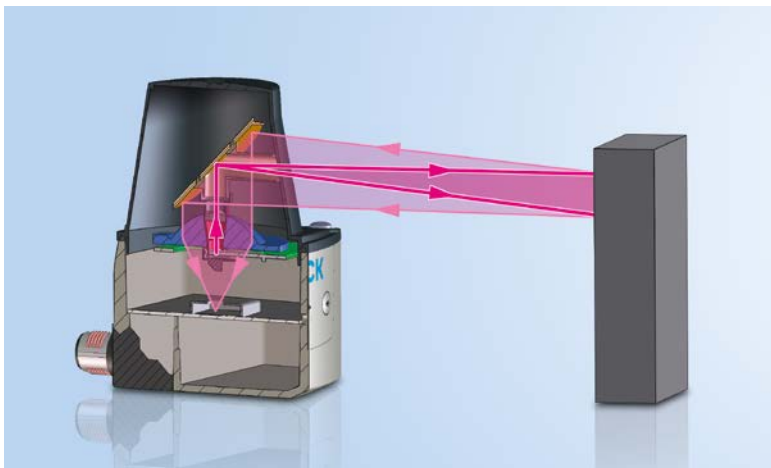


Fig. 11: Principio de funcionamiento del sensor 2D-LiDAR

Se mira desde el lado al polígono emisor y la luz recibida sobre el polígono receptor se dirige a través de una lente colectora al receptor lateral. Con un polígono, por medio de las frecuencias más bajas del motor, se logran velocidades de exploración altas, ya que al desviar con un espejo, cada faceta del polígono produce una exploración. Físicamente se produce una limitación del campo visual, según la cantidad de facetas y la estructura mecánica, a menos de 100° o 70° en el LMS4000.

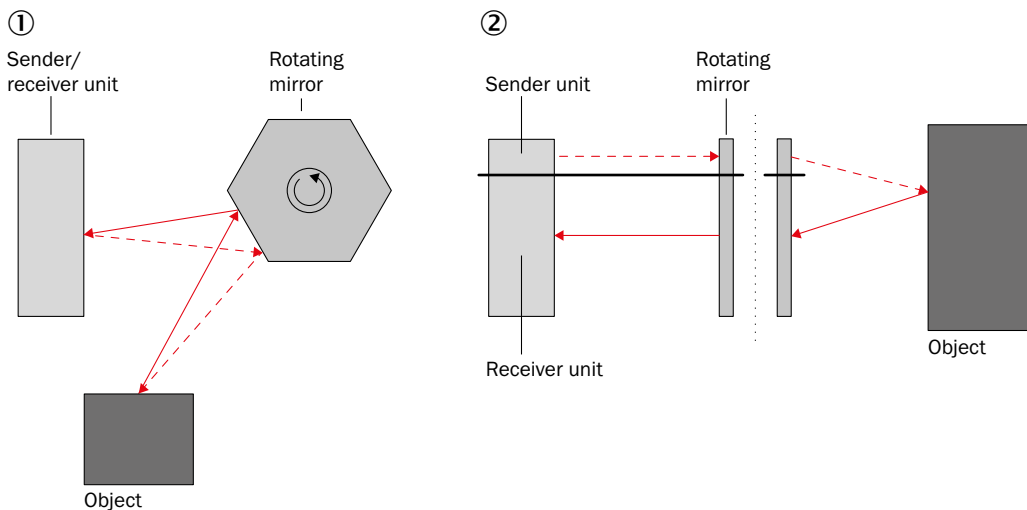


Fig. 12: Estructura del LMS4000, ① = Vista desde arriba; ② = Vista lateral

Como se describe, la frecuencia de exploración es una característica importante de los sensores LiDAR. Se logra un aumento de esta frecuencia de exploración usando varios emisores y receptores. En el LMS1000, el sensor LiDAR más avanzado de SICK, cuatro módulos de emisión y recepción dispuestos en forma de cruz (mirando desde arriba) giran en torno a su propio eje. Prácticamente se crean cuatro sensores láser, que a una distancia de fases de 90° escanean el mismo nivel, uno respecto al otro. Si el motor gira con 50 Hz (20 ms por vuelta completa), cada sector de 90° supone $\frac{1}{4}$ de los 20 ms. La vuelta completa de 360° está cubierta por cuatro módulos que solo deben realizar 90° . Esto significa que los campos visuales de 360° se realizan en 5 ms o, dicho de otro modo: El sensor trabaja con una velocidad de exploración de 200 Hz.

En los sensores LiDAR que miden en la superficie es relevante el aspecto de la resolución angular en el nivel de exploración. Incluye la información de si la superficie se explora sin vacíos. Para ello hay una gran variedad de sensores que ofrecen la resolución angular óptima para la aplicación respectiva. Por ejemplo, el LMS511 puede variar la resolución angular, utilizando la frecuencia de exploración. Su propagación del punto es mayor que la resolución angular del sensor y, por ello, permite una exploración superficial densa de la zona explorada. La distancia de exploración funcional comprende en los diferentes escáneres desde 10 m hasta 80 m. Esto es aplicable también para las problemáticas características de reflexión como, por ejemplo, una reflectancia de solo el 10 %.

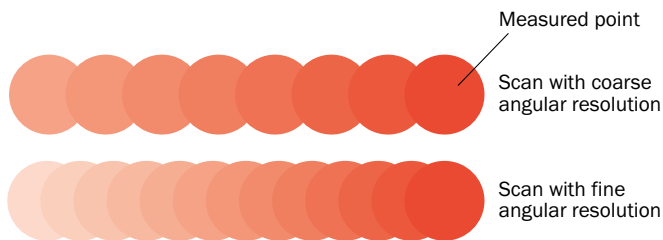


Fig. 13: Ejemplo LMS5xx

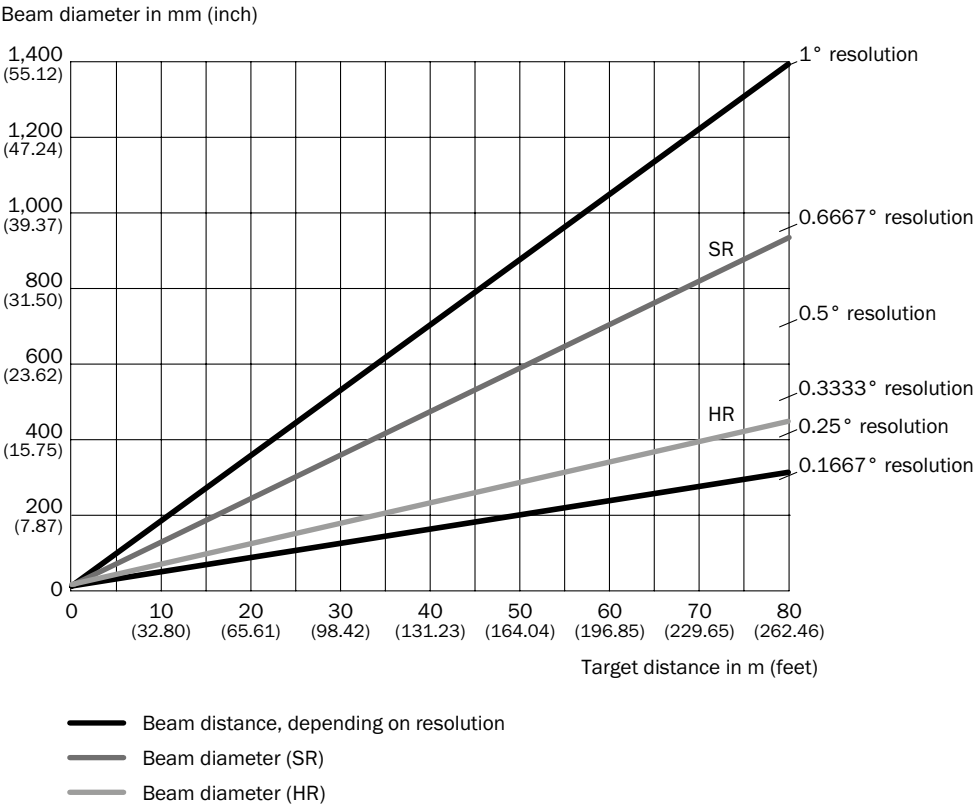


Fig. 14: Diámetro del haz y distancia entre los puntos de medición del LMS500 con 0 m hasta 80 m

Sensores de medición espacial (3D)

Partiendo del principio descrito de los sensores LiDAR que miden en la superficie, se plantea la pregunta de cómo pueden medirse objetos en tres dimensiones.

Para crear una imagen 3D a partir de un sensor 2D-LiDAR, además del telegrama de salida estándar de los datos, es necesario el punto de colocación mecánico del sensor en el mundo de coordenadas del usuario. Las exploraciones se emiten por medio del sellado de tiempo y la indexación, de modo que el usuario puede crear una representación lógica, con el tiempo y lugar apropiados, de las exploraciones emitidas secuencialmente. De este modo se obtiene en los objetos móviles una representación 3D bajo un sensor colocado fijo en un marco o poste. Lógicamente, en este caso es necesario el vector de velocidad del movimiento propio del objeto, con el fin de sincronizar la frecuencia de exploración de la toma con la distancia real de las exploraciones individuales sobre el objeto. De este modo puede medirse también la longitud de los objetos que pasan por debajo del sensor. Esto se produce, por ejemplo, en los sistemas de peaje que con los sensores láser proporcionan datos precisos sobre la clase de vehículo o en sistemas de medición de volumen, en los que los tamaños de los vehículos o de los objetos se miden con un excedente.

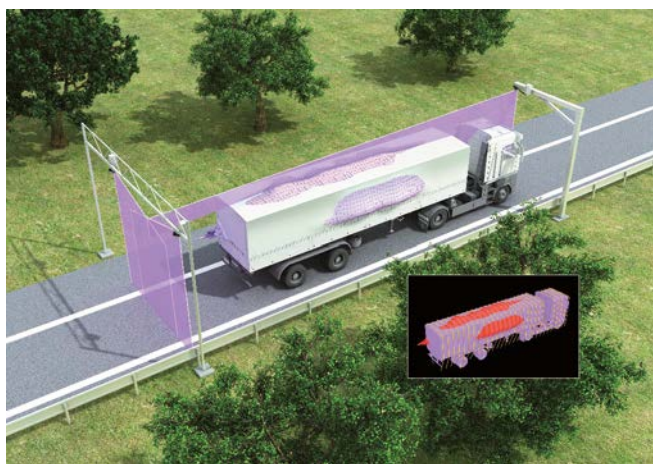


Fig. 15: Medición del perfil del camión con tres sensores 2D-LiDAR

En base a las informaciones que proporcionan los datos de medición del sensor puede “moverse” también cada sensor láser SICK. Esto se produce en los dispositivos basculantes o se crean “imágenes de distancia 3D” de los objetos por medio de ejes lineales. Normalmente, en este tipo de aplicación los objetos están parados. Por ejemplo, se trata de sistemas de medición de volumen o dispositivos de carga automáticos, como los que se utilizan para la carga de contenedores. Los sensores SICK, debido a su robusto diseño, resisten secuencias de movimiento como basculamiento, aceleración o frenado, sin problemas.

Escáner multiposición

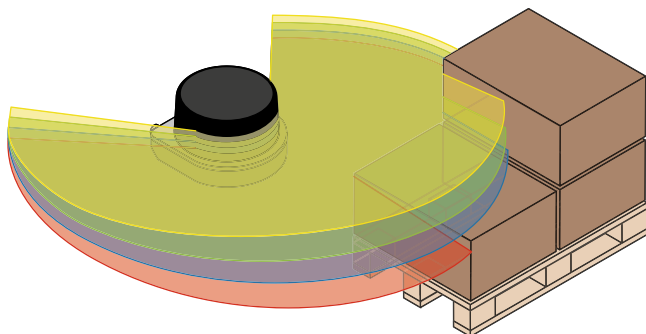


Fig. 16: Sensor LiDAR con 4 niveles de exploración

Las clases de dispositivos más avanzados de los sensores 3D-LiDAR ofrecen todavía más. Por medio de varios emisores y receptores o una combinación de ambos, se obtiene la posibilidad de crear sensores que exploren simultáneamente varias posiciones o con ángulo invertido. Esto significa que los sensores de la generación de dispositivos LD-MRS o MRS1000, así como MRS6000, además de la posición 2D orientada horizontalmente, que en un sensor alineado también horizontalmente constituye la posición 0°, cubren además otras posiciones inclinadas hacia arriba o hacia abajo.

Sensor 3D-LiDAR MRS1000

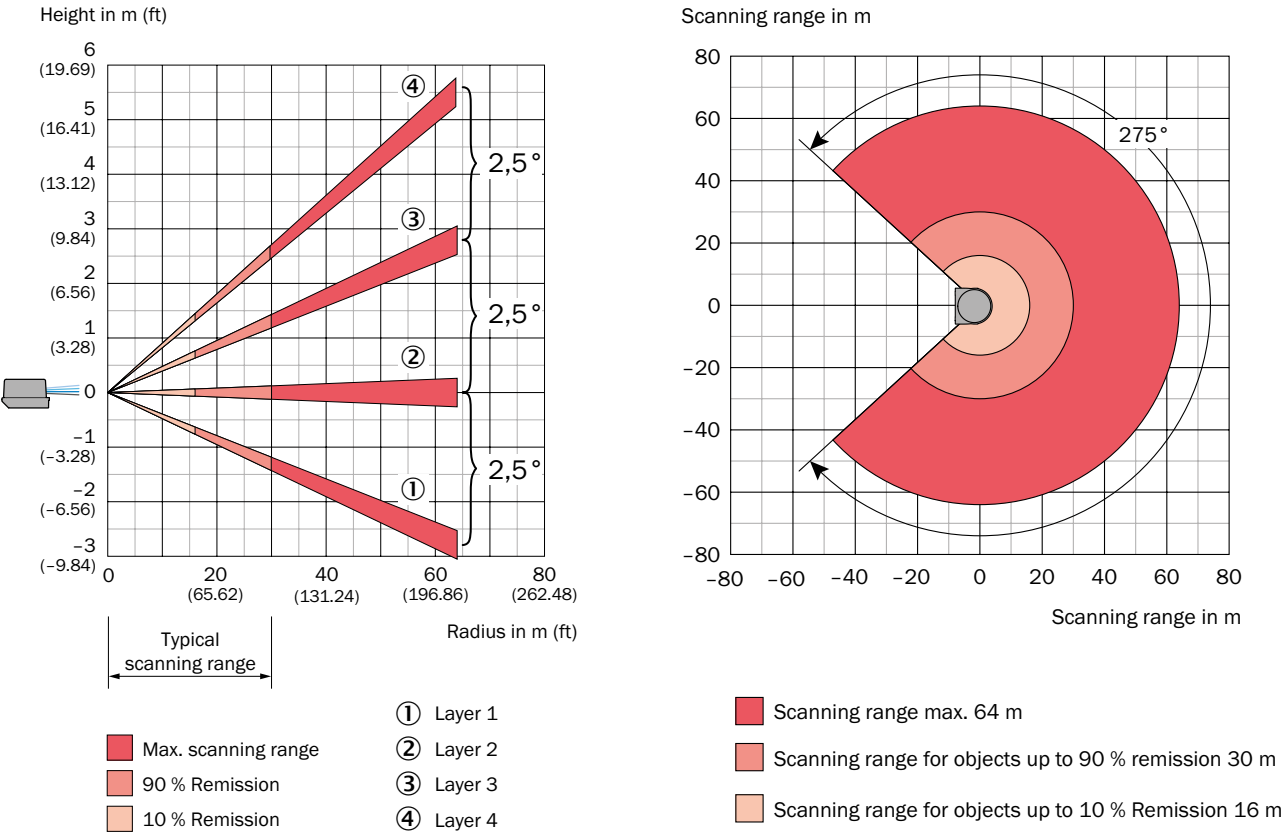


Fig. 17: Diagrama de ejemplo: MRS1000

La ventaja para el usuario es evidente. Girando se obtienen más puntos de medición. Para ello tienen que registrarse informaciones sobre la distancia, el ángulo en el nivel horizontal y el ángulo en los niveles del espacio tridimensional. De estos tres valores de las coordenadas espaciales pueden determinarse las posiciones de un punto de medición X, Y, Z en el sistema de coordenadas de origen. Este valor medido tiene, en gran parte, la misma disponibilidad normal para los sensores de SICK AG, como ya ocurre con los sensores 1D o 2D de SICK AG. El MRS1000 tiene, por ejemplo, cuatro posiciones que están inclinadas 2,5°, respectivamente. Para ello se registran en el mismo tiempo más puntos de medición que con los sensores 2D. La estructura mecánica de varias posiciones produce además una velocidad de exploración superior.

En los sistemas de varias posiciones existen diferentes modos de ejecución. En el MRS1000 se realiza la inclinación de las posiciones de los módulos emisores y receptores internos. De este modo, con un giro de 90° cada módulo cubre un sector. Los objetos que pueden verse en más de una posición se registran de este modo en un cuarto del tiempo de una vuelta completa.

Con los sensores 3D y el principio de medición, que funciona con una desviación del “ángulo de visión” de la ruta de emisión y recepción por medio de un espejo, se mantienen las ventajas de la medición con láser. Si los módulos se orientan en diferentes ángulos, en la medición de objetos, además de la distancia y el ángulo de la dirección de exploración pueden determinarse también el ángulo en el nivel de los objetos, es decir, las coordenadas x, y así como z en el espacio. Para la medición en cada nivel se mantienen las ventajas de la alta sensibilidad y la gran distancia de conmutación.

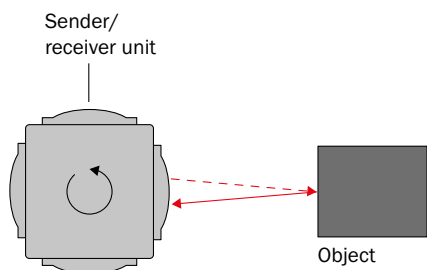


Fig. 18: Estructura del MRS1000

El MRS1000 alcanza, a una distancia de 16 m aprox., una cobertura lateral de 2 m aprox. Las posiciones inclinadas describen la curva envolvente de un cono.

Si se fija el sensor a un vehículo sin conductor, por ejemplo, un AGV o un AGC, que se mueve en un pasillo, el sensor explora superficies del objeto al pasar. Se obtiene una modificación de los campos de exploración con la posibilidad de inclinar el sensor. La inclinación de la posición en la zona de proximidad inferior a cinco metros se convierte en una exploración de 0,5 m aprox. de anchura. De este modo se tiene en cuenta el deseo de poder reaccionar rápidamente en la zona de proximidad, ya que también se exploran con cada posición objetos pequeños. Por medio de la disposición alternada 90° de los módulos de emisión y recepción esto se realiza cuatro veces más rápido que con la frecuencia de giro del módulo individual.

Sensor 3D-LiDAR MRS6000

En el MRS6000 se utiliza el efecto de espejo poligonal y dispone varios emisores superpuestos. Éste es un principio alternativo para crear más de un nivel de medición con un escáner. Con cada polígono de espejo se inclina el paquete emisor 6 veces, respectivamente y, de este modo, con una vuelta completa del polígono, con 4 lados del polígono se obtienen 24 posiciones. El MRS6000 ofrece una exploración sin fisuras de todo el ángulo de apertura horizontal total. Tiene un ángulo de apertura horizontal de 120° y vertical de 15°.

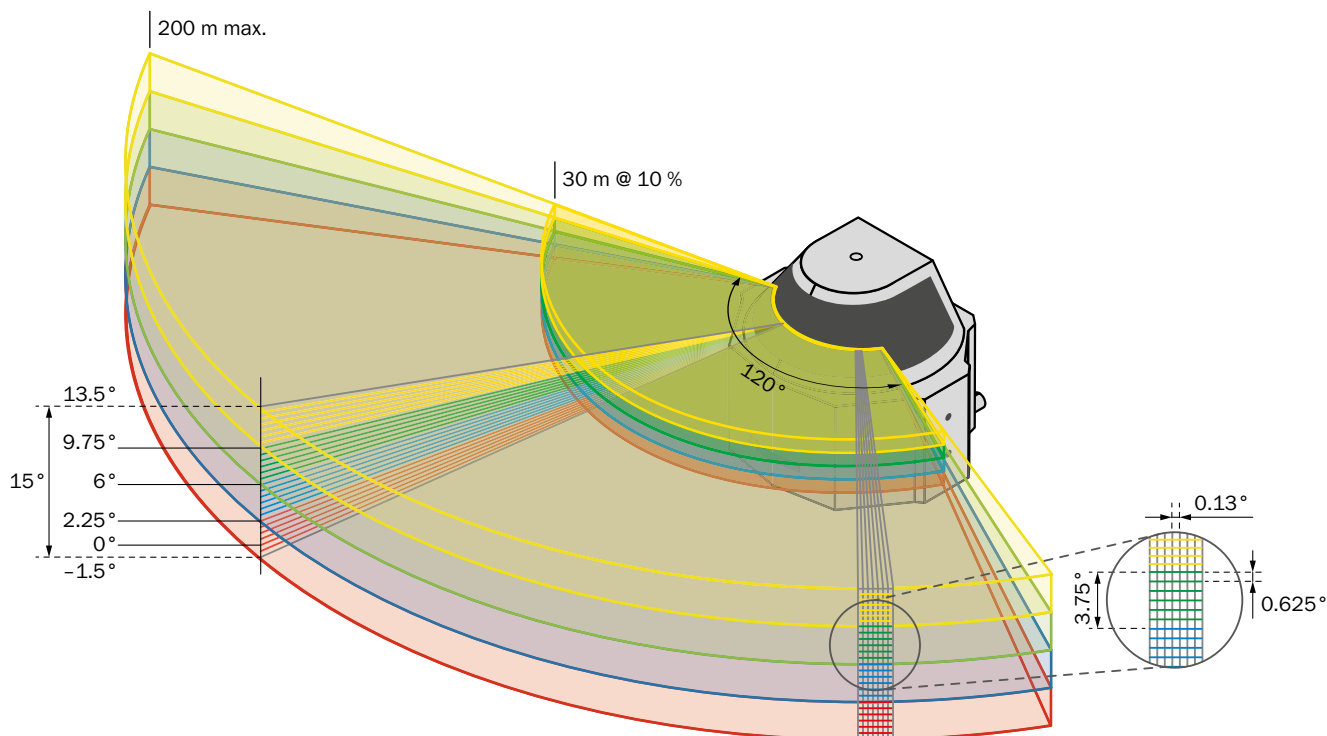


Fig. 19: Principio de funcionamiento, representación 3D

Sensor 3D-LiDAR LD-MRS

El escáner multiposición LD-MRS, con entre cuatro y ocho posiciones, cubre grandes distancias de conmutación de hasta 100 m, el MRS1000 de hasta 30 m de distancia de exploración para los AGV.

Con los sensores de la serie LD-MRS se usan dos diodos láser superpuestos como elementos emisores. La señal de recepción se divide además en dos elementos receptores. De este modo, el LD-MRS se convierte en un sensor con cuatro posiciones. La estructura mecánica es similar a la del escáner poligonal MRS6000, pero aquí el polígono consta de dos facetas, la parte delantera y trasera del espejo de desvío.

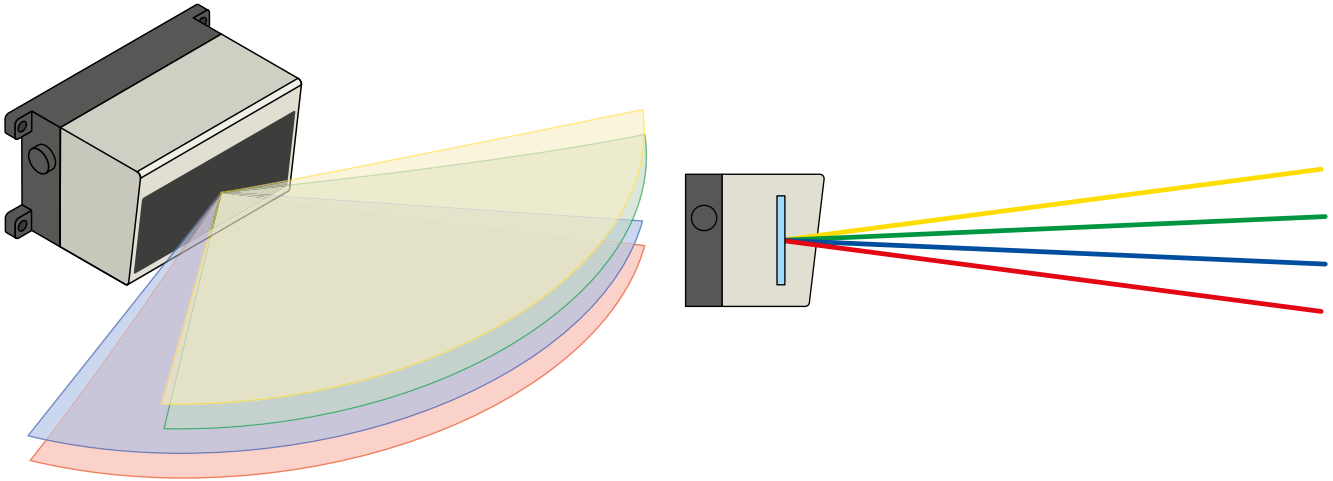


Fig. 20: Estructura de posiciones del LD-MRS

REFERENCIAS

- www.sick.com/2D_LiDAR_sensors
- www.sick.com/3D_LiDAR_sensors