

SICK AG

白皮書

LiDAR感測器的工作原理和產品系列

2018-07

作者

Harald Weber

LiDAR感測器測距產品單元主管

瓦爾德基爾希市 (德國) SICK AG 公司

概述

本文展示了衆多LiDAR應用。LiDAR感測器分爲1D、2D或3D產品系列，在世界各地的工業製造、交通系統或物流領域中得以應用。由於自動化技術的增多以及自動導引系統的不斷推廣，這些感測器即將在功能安全和物件的非接觸式辨識和評估方面起到越來越重要的作用。

最新的LiDAR代表產品包括Dx1000、TiMxxx、MRS1000、MRS6000或NAV等SICK感測器系列。它們完善了目前由LMS1xx、LMS5xx、LD-MRS和LD-LRS構成的產品系列。

目錄

LiDAR表示什麼？	2
LiDAR感測器的1D、2D或3D產品系列.....	2
雷射量測——各種量測方法	4
1D、2D或3D感測器的量測方法.....	9

引言

數十年間，LiDAR感測器廣泛應用於全球工業界。這些感測器保障人員安全，開始實現流程自動化。無論室內與室外區域，皆可靈活使用。例如，應用領域涵蓋港口自動化、交通管理系統及物品保護設備。

下文將闡明各種LiDAR產品系列的基本工作原理。此外，所選示例展現了非接觸式「隱形」雷射掃描器的應用方式。從中也可看出LiDAR應用對工業4.0的重要性。

LiDAR表示什麼？

現如今，基於非接觸式距離量測原理的雷射感測器已成為自動化領域的重要組成部分。這一發展趨勢始於所謂的TOF量測技術。TOF (Time of Flight) 意為光飛行時間，不過通常改稱為更準確的術語LADAR或普遍使用的LiDAR。LADAR (Laser Detection and Ranging，雷射檢測和測距) 或LiDAR (Light Detection and Ranging，光檢測和測距) 明顯借鑒常用術語RADAR，其表示無線電檢測和測距 (Radio Detection and Ranging)。

LiDAR感測器的1D、2D或3D產品系列

在距離量測裝置和感測系統中，精簡款LiDAR感測器可用作點狀距離量測系統。透過對準特定目標或反射片，進行直接距離量測。基於此方式進行一維 (距離) 作業的感測器被稱為一維感測器，即1D感測器。

在某一平面上旋轉或移動量測束可獲得距離和角度資料，由此提供二維結果。這類量測應用的感測器一般稱之為2D雷射掃描器或2D-LiDAR感測器。其按順序依次測定量測值，量測時間間隔通常相等。

若加之旋轉LiDAR感測器，則為三維作業。由此獲得x軸方向的距離和位置資訊，還有y軸及z軸方向的位置資訊。如果感測器中的多個投光和受光系統沿不同的水平角移動掃描時，亦可獲得關於各種空間參數的同類資訊。如今，此類感測器稱之為多層掃描器。

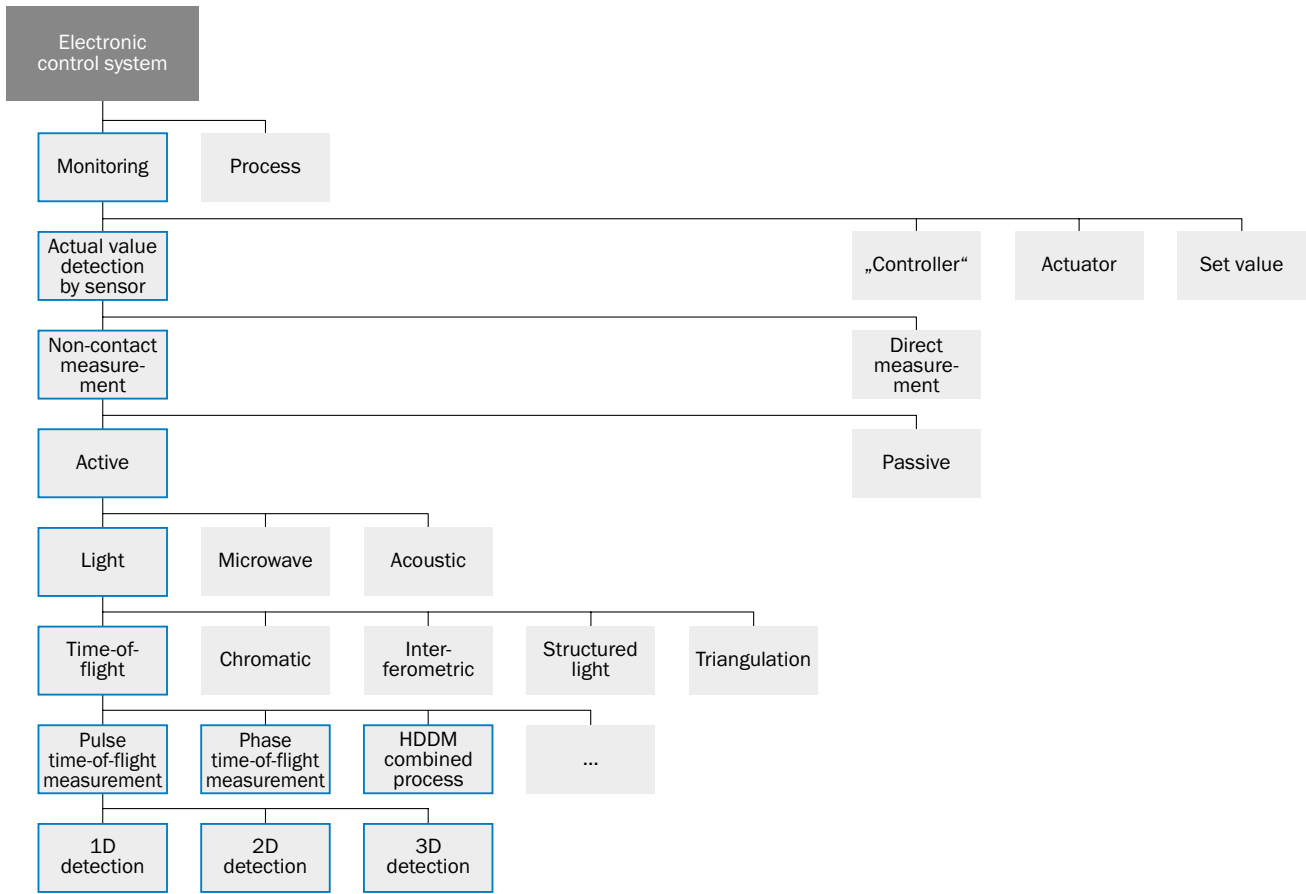


圖1：電子控制系統框架結構

LiDAR感測器多用於傳統工業控制系統。在質保應用中採用的LiDAR感測器將另行闡明。

控制系統

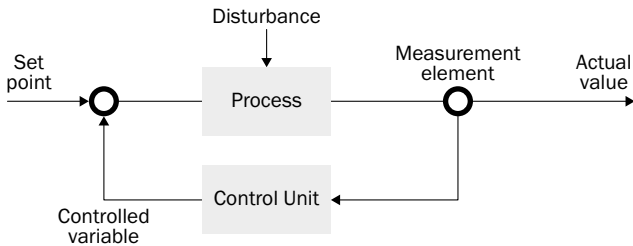


圖2：控制系統電路原理圖

LiDAR感測器在傳統控制系統的優勢：透過使用量測元件，在工作流程輸出中非接觸式採集實際值。若使用非接觸式量測方法，則無需向量測物施加機械壓力或其他壓力。由此確保此過程不會產生反作用，並為後續控制系統回路提供可追溯的可靠量測結果。

雷射量測——各種量測方法

使用雷射意味著主動照亮量測物。採取主動照明有助於感測器受光器在一切量測環境中對準發射源。感測器不依賴於外部光源，能夠在夜間、地底、隧道等環境中使用。無論在室外區域還是人造光下，效能始終如一。

當然，使用具備連續穩定的聚焦光束的雷射器也有其他優勢。例如，可以高空間精度明確用於檢測物件的投光信號。此時關鍵在於感測器採用人眼安全設計，同時滿足允許發射功率的相關法律要求。在2D和3D應用領域，聚焦投射雷射束能夠實現高解析度，從而對遠距離或精細結構物件進行掃描。

雷射用作投光源量測時，必須使用適宜的受光元件。投光器、受光器及擁有高時間解析度的評估元件組成LiDAR感測器的核心部分。如要使用獲取量測資料，下游電子回路至關重要。機械對準投光和受光元件的資料與對感測器應用進行性能技術調整的資料於此匯總。

非接觸式量測方法要求能夠按照感測器的量測原理解測量測物。這意味著，使用雷射時雷射束必須無干擾地直「射」物件並從物件射出。非接觸式雷射量測的一大優勢體現在，它適用於具有幾乎任何特性的量測物。因此，基於雷射的非接觸式檢測在工業領域中具有諸多應用選項。雷射型量測感測器可用於物流（輸送流程等）、道路交通流量檢測或者港口集裝箱的裝卸流程自動化等。

雷射脈衝的反射光輸出直接取決於量測物的物理特徵及距離。由於雷射脈衝沿投光方向呈直角平面擴散（即發散），到達物件單位面積上的光輸出將相應減少，具體視距離而定。擴散條件同樣適用於反射光。另外，對準待照射表面時無需確保所有反射光均沿感測器方向射回。通常，只有一小部分反射光到達LiDAR感測器的受光器。

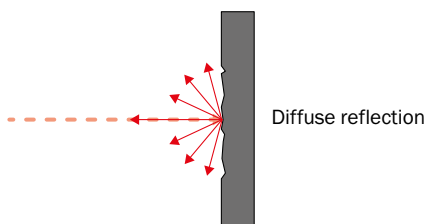


圖3：物件表面的光線反射

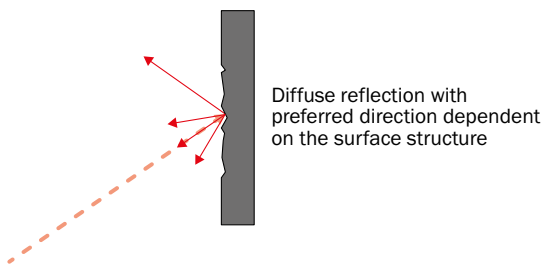


圖4：反射角

物件反射量直接取決於物件的物理特徵。也就是所謂的反射率。此值由物件的光澤度和反射特性決定。柯達標準表格中規定了反射率（百分比值）。無煙煤的反射率約為5%、黑色啞光鞋面革約為10%，而白色石膏牆則約為90%。將光反射回光源的逆向反射器的反射率可高達10,000%，反射帶亦可達到3,000%。無論物件緊鄰感測器前方還是相距甚遠，其反射特徵均對感測器受光器的動態性能提出挑戰。若雷射投光器、脈衝能量和受光器靈敏度能彼此完美配合，LiDAR感測器亦能可靠量測遠距離的低反射率物件。

若使用雷射量測距離，則將在直射路徑中檢測物件與感測器之間的最短距離。這屬於一大優勢：按照光速量測可防止額外偏轉，避免出現額外「放大」。然而在少數應用中，它亦是一項缺陷。因為可能難以量測放在玻璃板或包裝膜後方的物件。即使某些應用有特殊要求，LiDAR感測器也無法全方位「觀測」，通常也不能透視物件。透明物件大多會干擾量測值，但應用中通常可藉助多重回波等技術可靠濾除。

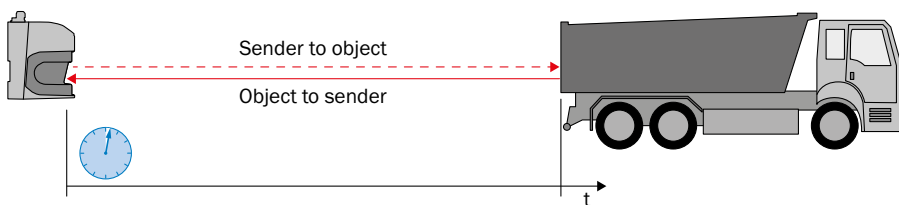


圖5：採用脈衝飛行時間量測的距離量測

選擇適宜的量測方法，按照具體應用優化LiDAR感測器。

相位相關量測法

相位相關法也在白皮書HDDM+ (8022026) 中加以闡述。這是一種常見的距離量測法。每條連續的雷射束將分配到一個特定頻率的信號。之後在受光器中檢測投光束和受光束之間的相位飛行時間差，並由評估元件予以評估。相位差同感測器與物件之間的距離有關。此方法的系統性缺陷在於：如果量測相位差時此值大於 360° ，則無法獲得確切的距離參數。通常稱之為確切測距範圍（ $< 360^\circ$ ）。在一維系統中，通過切換不同波長對應頻率的感測器是一種解決方案，此感測器經由量測值的邏輯對比來實現大檢測範圍和高量測準確度。

脈衝飛行時間量測法

脈衝飛行時間量測法確保LiDAR感測器能在檢測範圍高達數百米時順利運作。同時還提供經由計量器在數釐米範圍內檢測光飛行時間的感測器。脈衝飛行時間量測法採用投光器、物件和受光器之間的純光脈衝飛行時間。如果物件反射雷射脈衝，則量測中將檢測物件和感測器之間的最短距離。由於按照光速量測，LiDAR感測器基於脈衝飛行時間量測法提供的量測值具備出眾可靠性與可用性。

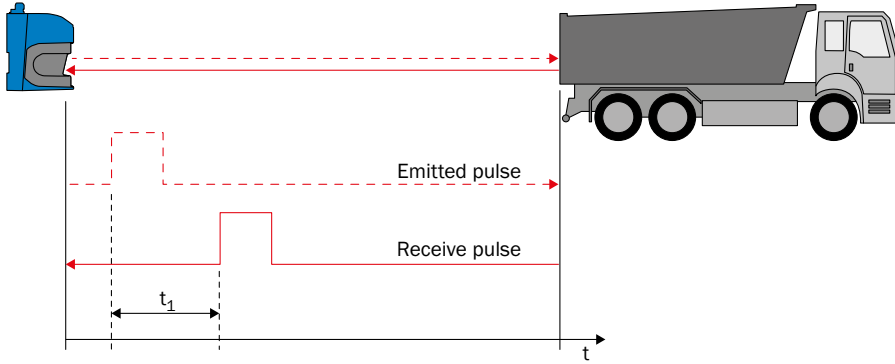


圖6：光飛行時間量測的功能原理

HDDM+ (統計評估) 量測法：

加強型高解析度距離量測 (HDDM+) 是一種統計式量測方法。此方法已在白皮書HDDM+(8022026) 中詳加闡述。此方法利用多個單獨脈衝的集聚效應，即其會按照已知的傳輸模式重新編組，並以統計學方式提供有關距離和回波信號的資訊。

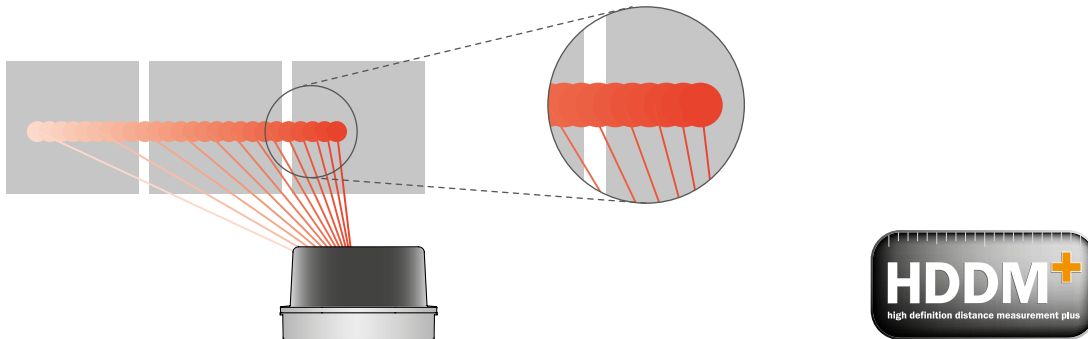


圖7：掃描範圍的無間斷檢測，以SICK LiDAR感測器MRS1000為例

評估量測束中的多個接收脈衝

由於在實踐中不存在無限短的雷射脈衝，光點也無法沿擴散方向無限聚焦（小），感測器可以利用由此產生的物理效應來計算量測值。最為常見的效應便是反射回波信號，其可用於多重採樣。若雷射光點大於量測物，光點部分位於邊緣上，則部分光脈衝將由第一個量測體反射，而另一部分則由其後方表面（如有）反射。此效應可重複多次，實現後續量測。當前的目標在於研發出一種能使此類表面干擾效應服務於應用的方法。客戶從感測器獲取相應角度反射回波的距離和回波值。一維感測器中的有效回波多達八個，而掃描感測器中至多為五個。透過發射多個回波，LiDAR感測器亦可用於室外區域。由此能夠可靠濾除視野範圍內因雨、雪、灰塵及冰雹造成的干擾量測值。

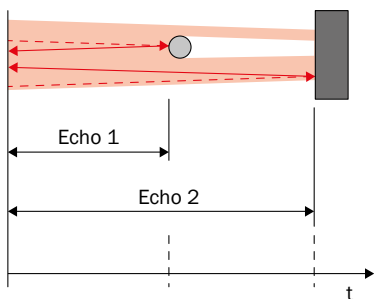


圖8：物件小於雷射束直徑

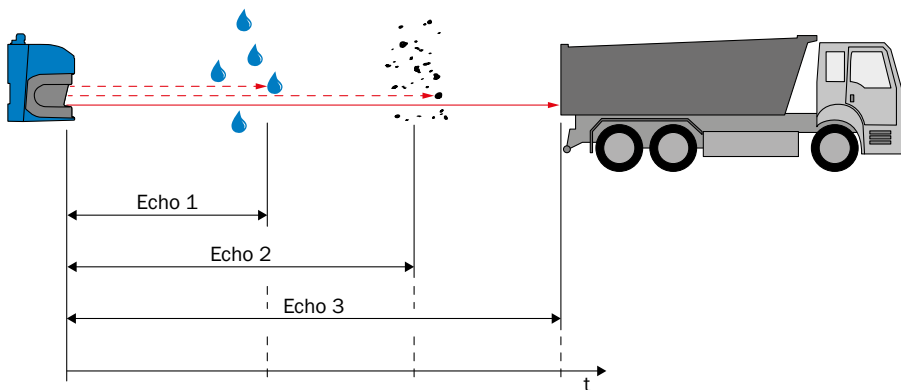


圖9：量測束的多重回波效應

LiDAR感測器能夠針對單位角度行程檢測不同距離的單個量測值，若採用多重回波系統則可檢測多個量測值。可傳輸此量測值以供內部評估或外部資料輸出使用。一旦在給定角度上檢測到量測值，則經由脈衝飛行時間量測法可確保物件位於此量測束上。若LiDAR感測器安裝在車輛上，則兩次連續量測不一定與同一物件有關。在後續應用中必須進行評估，以確定量測值是否屬於該應用或是否應濾除（例如因部分位於可視範圍內而形成）。使用量測型雷射感測器時，使用者可自由安裝適合應用的篩選器。此外，感測器通常具有可配置的附加篩選器。感測器資料掃描包含用於確定量測時間的時間標記，其可與外部資料源同步。

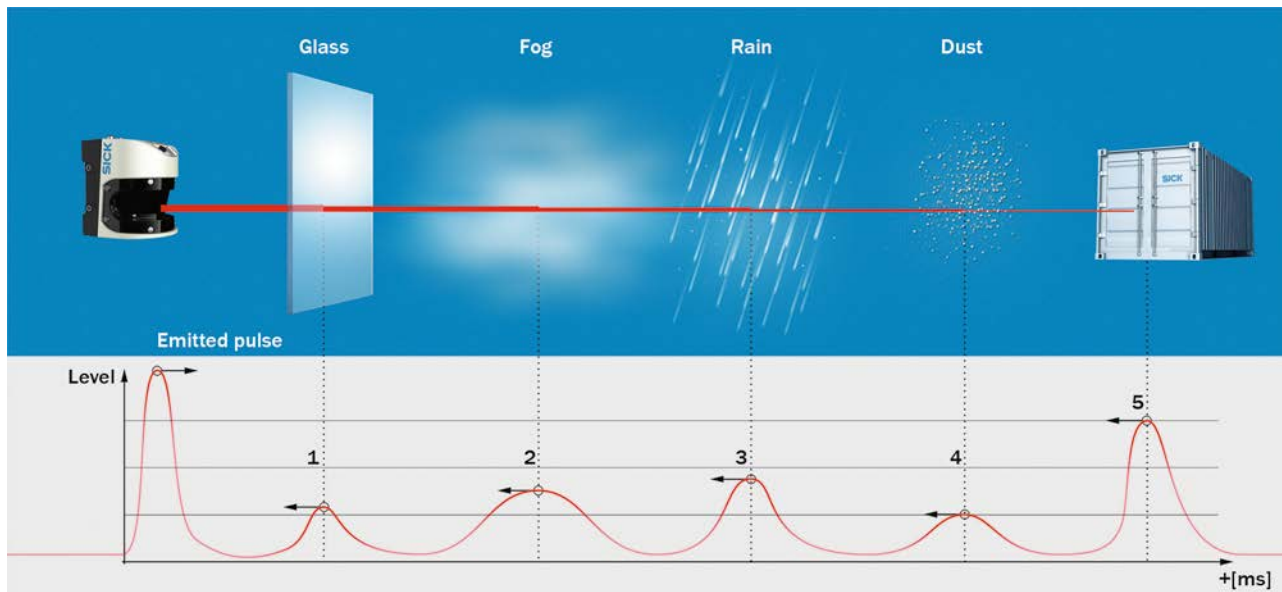


圖10：LMS5xx多重回波分析

1D、2D或3D感測器的量測方法

線性量測感測器 (1D)

Dx1000等距離感測器沿被測物方向實施一維線性掃描，從而確定與特定目標（反射率高達100%）或反射片的距離及距離變化。量測反射片時，檢測範圍最高可達1,500 m (DL1000)。例如，藉助線性量測感測器能以準確間距定位大型起重機，從而完成夾取與卸載工序。量測循環時間視應用而定進行優化，由此確保可靠、極精確地採集遠距離與快速距離變化。詳細資訊可查閱Dx1000操作說明 (DE: 8019330, EN: 8019329)——採用最先進量測方法的標準1D感測器。

平面量測感測器 (2D)

2D感測器的研發初衷在於保留雷射系統出色量測特性並將其移植給平面量測感測器。此時所用方法（透過偏轉鏡偏轉雷射束）似乎比較簡單。但是麻煩在於細節方面。許多掃描感測器是同軸量測系統。投光束位於受光束中間。如今經由偏轉鏡轉向。這樣可保留上述所有使用雷射量測擁有的出色特性，例如檢測範圍大、即使面對深色物件依然強悍的量測實力。

對於LiDAR感測器，雷射脈衝的依次發射順序與電機旋轉頻率及所需角度解析度同步。通常由雷射源的最大發射頻率和所需角度解析度決定電機轉速。如果雷射線路不允許，則無法在一個旋轉週期內再產生脈衝。

掃描感測器的優勢也體現在發射順序的精準角度和角度解析度，還有高量測頻率（電機轉速）。

透過鏡子偏轉雷射束時，要求具備高機械精度。

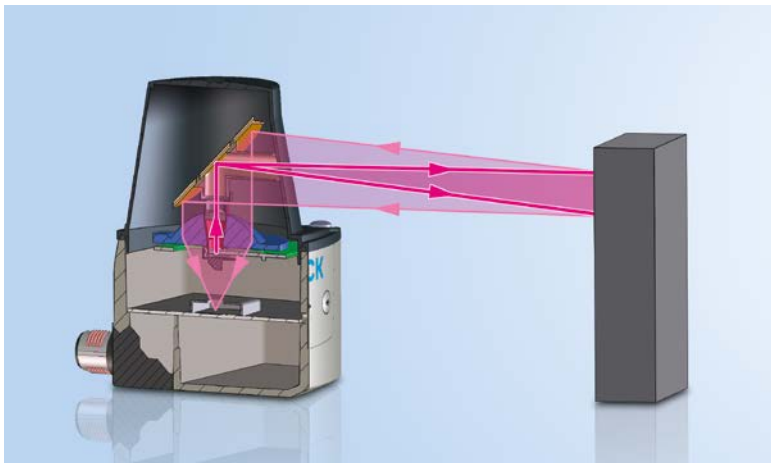


圖11：2D-LiDAR感測器功能原理

圖示為多邊形投光器視角，多邊形受光器上的接收光透過聚光鏡導至側面受光器。使用多邊形構造可在低電機轉速下實現高掃描率，原因在於使用偏轉鏡轉向時，每個多邊形面都能產生掃描線。所以視野範圍存在物理限制，視多邊形面數與機械結構而定不超過100度，LMS4000為70度。

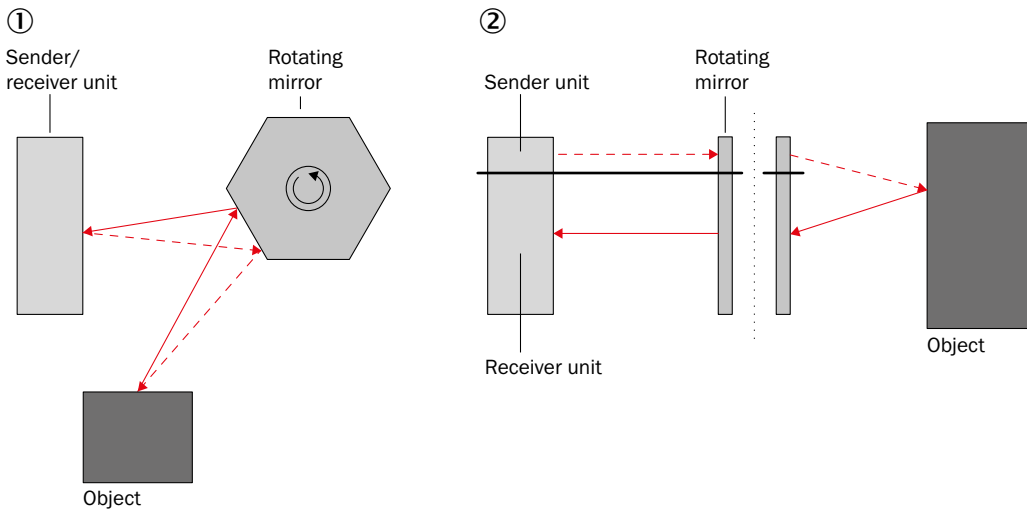


圖12：LMS4000結構佈局。① = 俯視圖；② = 側視圖

如前所述，掃描頻率是LiDAR感測器的最關鍵要素。透過使用多個投光器與受光器可提高取樣率。在SICK最新款LiDAR感測器LMS1000中，共有4個投受光模組以交叉佈局（俯視）圍繞其軸旋轉。實際上存在四個雷射感測器，彼此間以90度相位距掃描同一平面。如果電機以50 Hz頻率旋轉（轉滿一圈20 ms），則現將以20 ms的¼時間掃描每個90度區域。透過四個模組轉滿一圈360度，其中每個模組僅需掃描90度。這意味著360度視野範圍將在5 ms內掃描完畢，換言之：感測器以200-Hz的取樣率運作。

在平面量測LiDAR感測器中，角度解析度與掃描平面相關。其包含是否無間斷完整掃描平面的資訊。為此，許多感測器根據具體應用提供最佳角度解析度。例如，LMS511可藉助掃描頻率改變角度解析度。其雷射光點尺寸大於感測器的角度解析度，由此實現掃描區域的全方位檢測。不同掃描器的有效掃描距離為10至80 m不等。這也適用於高要求的回射束特性，例如反射率僅為10%時。

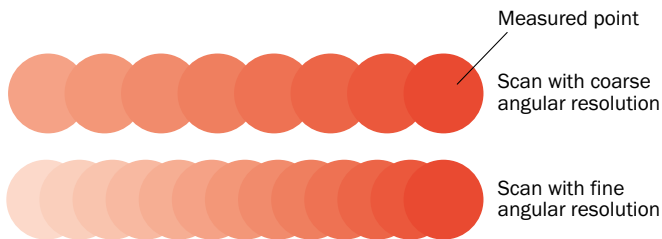


圖13：LMS5xx示例

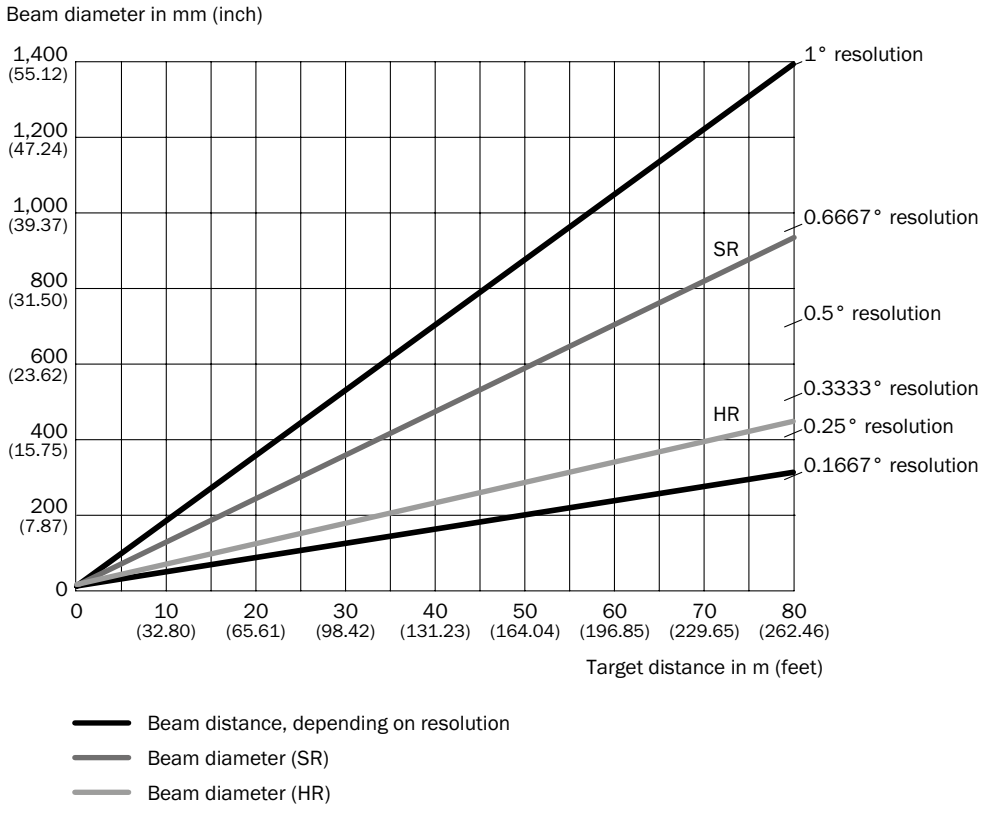


圖14：從0 m到80 m · LMS500量測點之間的光束直徑與間距

立體量測感測器 (3D)

說完上述的平面量測LiDAR感測器原理後，現在有個問題：如何能三維量測物件？

如要從2D-LiDAR感測器的量測資料中生成3D圖像，除了標準資料輸出訊息，還需要感測器在使用者坐標體系的機械安裝位置。輸出掃描圖像時帶有時間標記與索引，讓使用者能以符合邏輯、時間和位置準確無誤的方式創建連續輸出的掃描圖像。即使物件移動，也可透過牢牢安裝在機架或支柱上的感測器生成3D圖像。理論上，此時還需要物件自身移動的速度向量，以便同步記錄掃描頻率與各次掃描物件的實際距離。由此也可量測經過感測器下方的物件長度。例如可應用於收費系統，其藉助雷射感測器提供關於車輛級別的詳細資料，或者是量測車輛尺寸或超寬物件的體積量測系統。

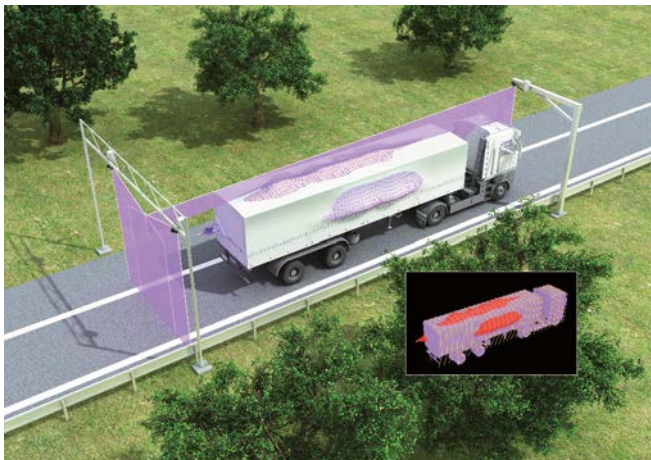


圖15：利用3臺2D-LiDAR感測器量測卡車輪廓

基於感測器量測資料提供的訊息，每台SICK雷射感測器也可自行「移動」。移動情況包括轉動設備或利用線性軸創建物件「3D間距圖像」。在此類應用中，物件通常保持靜止。舉例來說：用於高架起重機的自動卸載裝置或體積量測系統。憑藉耐用設計，SICK感測器可從容應對轉動、加速或制動等移動過程。

多層掃描器

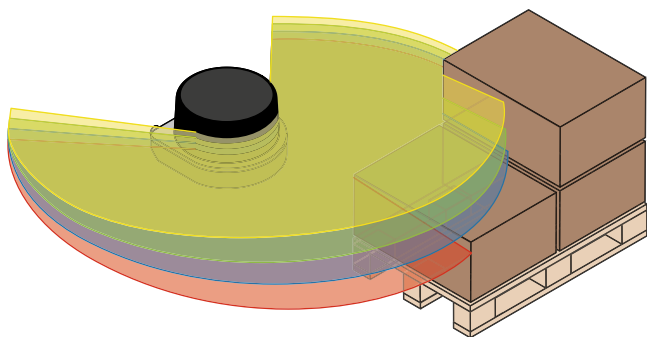


圖16：擁有4層掃描面的LiDAR感測器

3D-LiDAR感測器的最新裝置系列帶來更多特性。透過多個投光器與受光器或二者組合，可構築能同時或偏角掃描多個平面的感測器。這意味著，LD-MRS或MRS1000及MRS6000裝置系列的感測器除了能應對水平方向的2D平面（也就是水平放置感測器時的0°平面），還能掃描向上或向下斜置的平面。

MRS1000 3D-LiDAR感測器

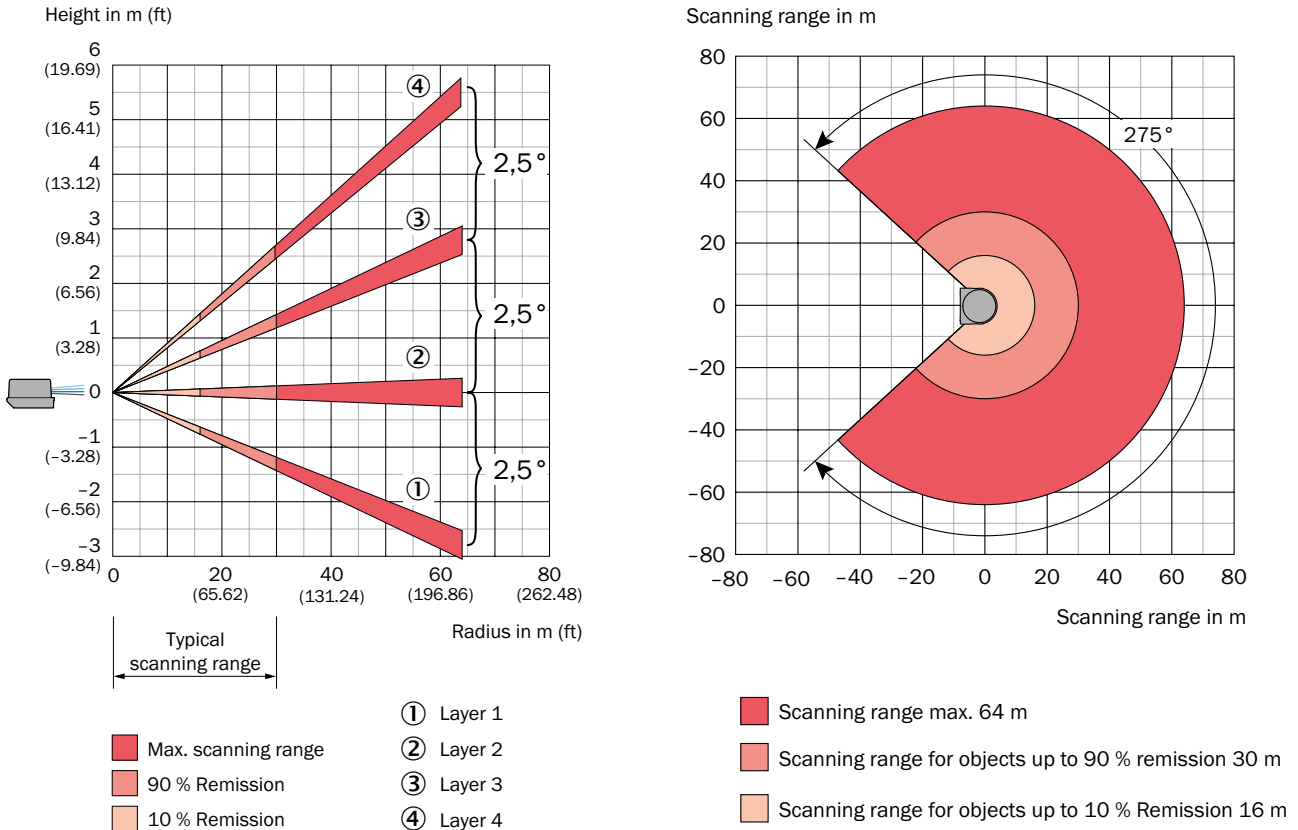


圖17：MRS1000示例圖

對使用者的優勢顯而易見。經由旋轉形成更多量測點。為此應採集距離、水平面角度、三維空間平面角度等訊息。根據這三種空間坐標值，可確定量測點X、Y、Z在原始坐標系的位置。與SICK AG的1D或2D感測器相同，這些量測值大多也具備SICK AG感測器慣有的可用性。例如，MRS1000擁有可分別傾斜2.5°的四個平面。相比2D感測器，在同樣時間內能採集更多量測點。此外，機械式多層結構還有助於提高掃描速度。

多層系統擁有不同規格可供選購。在MRS1000中，內置投光與受光模組彼此斜置。由此每個模組能旋轉90°掃描一個區域。這樣，只需轉整圈的四分之一時間便可採集到橫跨多個平面的物件。

在3D感測器及利用偏轉鏡偏轉投光路徑「視角」的量測原理中，保留了利用雷射量測的優勢。如果以不同角度定向模組，則在量測物件時，除了掃描方向的距離和角度，還會確定物件平面的角度，也就是x、y與z空間坐標。若在所有平面上進行量測，則能保留高靈敏度和大掃描範圍的優勢。

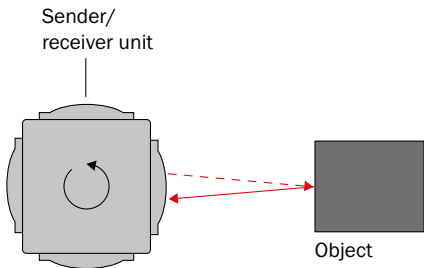


圖18：MRS1000結構

MRS1000可在距離約16 m時實現2 m左右的橫向覆蓋。扇形包圍線表示傾斜平面。

若感測器安裝在穿行通道的無人駕駛車輛（例如AGV或AGC）上，則可藉此在物件經過時掃描其表面。透過傾斜感測器改變掃描區域。五米內的近距離平面斜置會造成約0.5 m寬的掃描變化。由此可實現近距離快速反應，因為即使是微小物件也可利用各平面予以掃描。透過偏置90度的投受光模組佈局，與單個模塊的旋轉頻率相比掃描速度快四倍。

MRS6000 3D-LiDAR感測器

在MRS6000中，可利用多面鏡效果疊放佈置多個投光器。這是令一台掃描器具備多個量測平面的另一種方法。每個多面鏡用於傾斜含6條光束的投光組合，因此多邊形若轉滿一圈，就可透過4個多邊形面得到24個平面。MRS6000實現全方位掃描完整水平孔徑角。其具備120度的水平孔徑角與15度的垂直孔徑角。

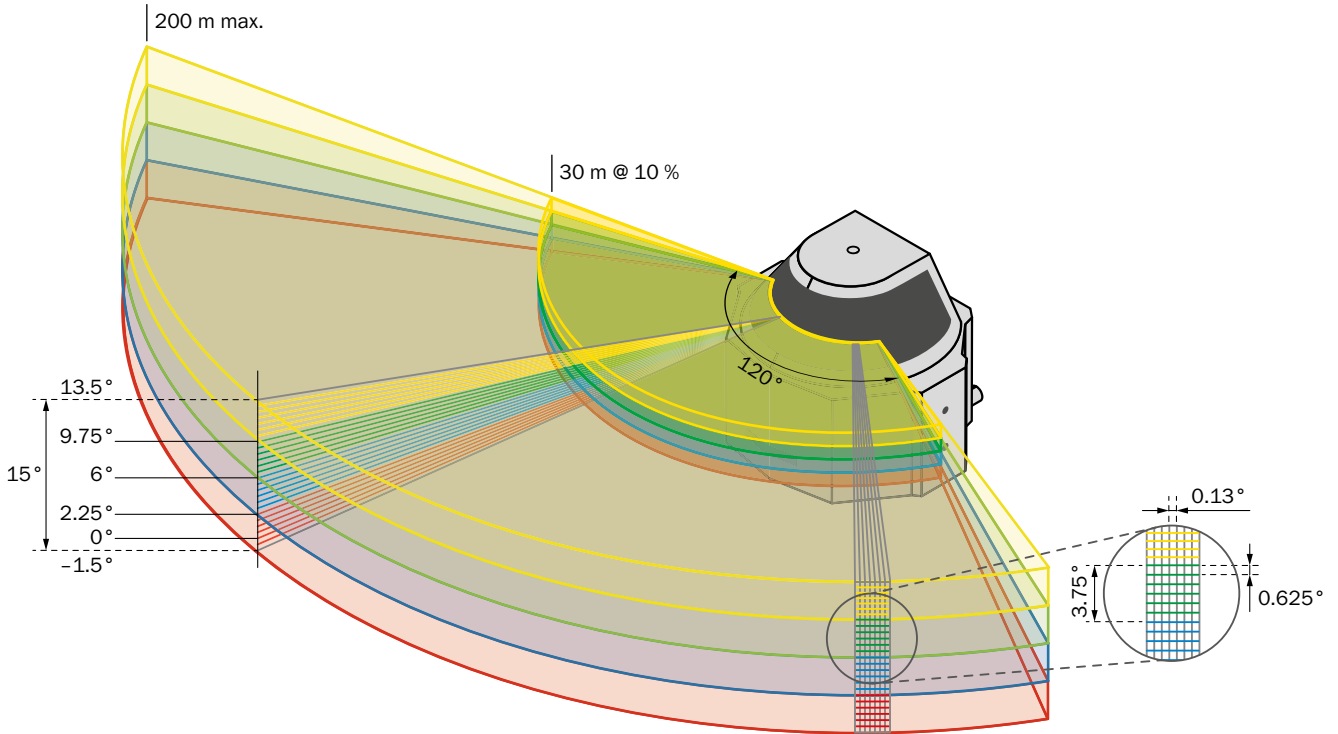


圖19：功能原理·3D視圖

3D-LiDAR感測器LD-MRS

多層掃描器LD-MRS憑藉4至8個掃描面覆蓋高達100 m的掃描範圍，而MRS1000可在AGV間距掃描中達到不超過30 m的掃描範圍。

LD-MRS系列感測器使用兩個高級雷射二極管作為投光元件。此外，受光信號可分別對應2個受光元件。因此，LD-MRS成為具備四個平面的感測器。其機械構造與MRS6000多邊形掃描器類似，但它的多邊形由兩面構成，轉角鏡正面與背面。

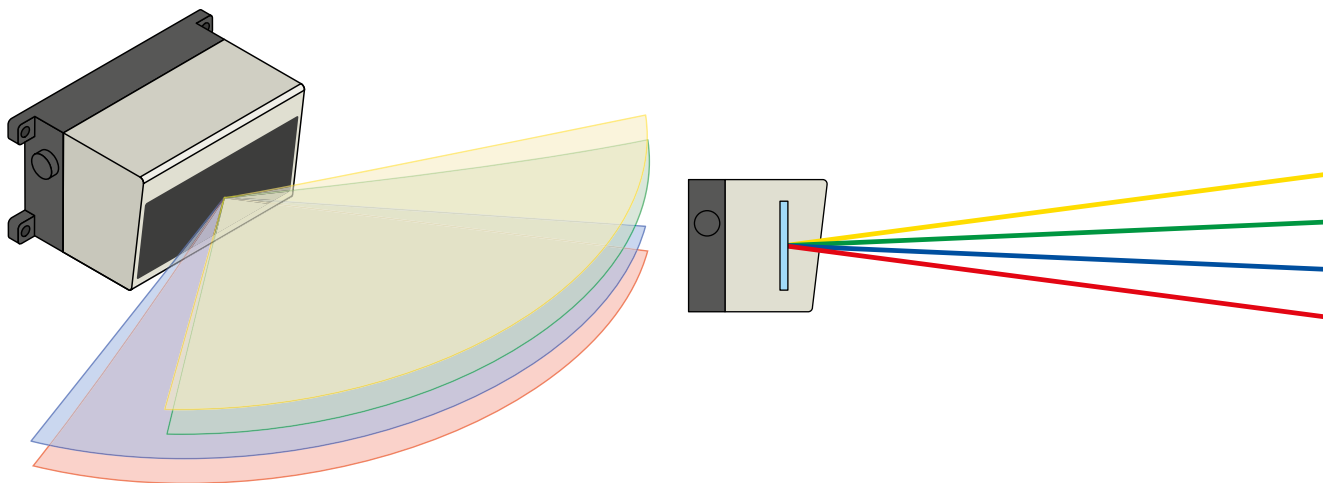


圖20：LD-MRS平面佈局

参考

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