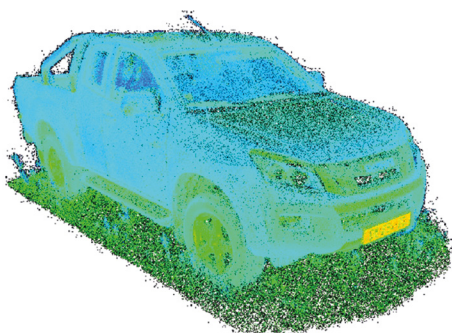


PERCEPTION LIDAR 3D POUR L'AIDE À LA CONDUITE AUTONOME

Nicolas RIVIERE¹, Paul-Édouard DUPOUY¹

¹ ONERA, The French Aerospace Lab, Département Optique et Techniques Associées, Toulouse

*nicolas.riviere@onera.fr



Le LiDAR 3D est une technique d'imagerie active qui délivre une information tridimensionnelle des objets en haute résolution. Elle bénéficie de nombreux avantages comme la faible sensibilité à l'éclairage naturel ou à l'environnement opérationnel pour des applications de navigation autonome ou de cartographie précise.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211528>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Les travaux de recherche et applications dans le domaine des villes intelligentes et des véhicules autonomes font de plus en plus appel aux avantages de la perception en trois dimensions de l'environnement. Les développeurs se tournent vers le LiDAR 3D soit pour compléter les technologies de détection existantes voire les remplacer, soit pour créer des solutions qui étaient autrefois irréalisables.

Contrairement aux technologies de perception 2D existantes, le LiDAR 3D produit des mesures spatiales détaillées permettant de produire des cartographies précises d'une

scène. Il fonctionne en environnements contraints, de jour comme de nuit, en présence de lumière directe du soleil et quelles que soient les conditions météorologiques (pluie, brouillard...).

Le secteur automobile a été l'un des premiers à adopter cette technologie à des fins de perception et d'aide à la navigation autonome grand public. La conduite autonome entre dans une phase de pré-industrialisation, avec des progrès significatifs réalisés ces dernières années. Le système de perception embarqué et dédié à la navigation autonome est une combinaison de capteurs actifs et passifs tels que des caméras (visible et infrarouge), des radars et des LiDAR 3D

[01]. La technologie LiDAR 3D est encore trop chère pour être produite à grande échelle et équiper les voitures grand public à un prix abordable. Aujourd'hui, la concurrence est intense entre plus de 100 nouveaux fabricants de systèmes LiDAR 3D. Le rapport performances / coût devient donc plus attractif pour d'autres applications moins sensibles au prix dans de nombreux marchés verticaux tels que les villes intelligentes, la sûreté et la sécurité, la robotique mobile (incluant les drones) et certaines applications industrielles.

Contrairement à ce que pense la majorité des observateurs de l'industrie automobile, ce ne sont pas uniquement les coûts ou les

performances qui empêchent une adoption plus large du LiDAR. C'est la richesse de l'information acquise et la complexité associée à l'exploitation des données issues de cette technologie qui constituent les principaux freins à son développement grand public. Cette remarque est d'autant plus vraie lorsqu'une application temps réel est recherchée, contrairement à la cartographie 3D aérienne par exemple où des temps de post-traitement relativement longs sont acceptables.

TECHNOLOGIES LIDAR 3D

Différentes familles de systèmes LiDAR 3D sont disponibles. Elles dépendent de la technologie et de la méthode de mesure mises en œuvre : mesure par modulation ou dite « temps de vol » de l'impulsion, mode d'acquisition par balayage (scanner) ou non (mode flash), méthode de détection en mode linéaire ou Geiger... À la base, tous ces systèmes émettent une impulsion laser puis acquièrent l'impulsion retour après réflexion sur des objets présents dans la scène. Le temps entre l'émission de l'impulsion et son retour détecté par le système permet de télémétrer la distance entre le LiDAR et l'objet éclairé. Certains instruments enregistrent plusieurs échos retours sur une même ligne de visée, leur permettant de mesurer dans certains cas un premier écho retour correspondant à l'enveloppe de la végétation et un dernier écho retour correspondant au sol (voir Fig. 1). Cela implique une capacité à détecter et à localiser des objets plus petits que la taille du spot du faisceau laser. Le résultat de la mesure est représenté sous la forme d'un nuage de points 3D incluant une information en intensité (voire en réflectance équivalente si l'instrument est étalonné). Pour des applications embarquées, la connaissance à tout instant de l'attitude du porteur (véhicule roulant, drone, avion ou navire) en termes de localisation et d'orientation est indispensable pour géo-référencer dans l'espace tous les points 3D acquis.

La mesure de télémétrie obéit à l'équation lidar qui relie la puissance optique reçue sur le détecteur (P_R) à la puissance émise puis transmise (P_T), au paramètre

de forme (K) et à la largeur du faisceau φ (en radians), à la distance de la cible (R), à l'aire effectivement éclairée sur la cible (A), au facteur de réflectivité spécifique au matériau en fonction de l'angle d'éclairage (B), aux facteurs d'atténuation pour la transmission et la propagation retour (η_T et η_R) et au diamètre de l'ouverture du récepteur (D).

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{K}{\varphi^2}\right) \cdot \left(\frac{\eta_T}{4\pi R^2}\right) \cdot (A \cdot B) \cdot \left(\frac{\eta_R}{4\pi R^2}\right) \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$$

La résolution transversale pour les LiDAR 3D est définie par le critère de Rayleigh. Elle dépend, entre autres, de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture du récepteur. La taille angulaire typique du faisceau optique pour un imageur LiDAR est de l'ordre de 0,1 à 1,0 mrad. Cette taille augmente et la résolution spatiale diminue avec la distance. La résolution en profondeur est définie quant à elle par la précision de l'électronique de synchronisation et reste constante quelle que soit la portée. Pour les systèmes LiDAR 3D et pour la plupart des distances d'intérêt (souvent inférieures à 2 km), la taille du spot laser et la résolution en profondeur évoluent peu, permettant d'atteindre des résolutions compatibles des exigences de navigation ou de cartographie précise. Ainsi, la résolution en distance est de quelques centimètres à quelques millimètres. L'échantillonnage et la génération du nuage de points 3D sont réalisés soit par balayage du faisceau laser sur la scène, soit par une approche dite LiDAR Flash à plan focal. Comme son nom l'indique, un LiDAR 3D scanner balaye la scène à l'aide d'un ou plusieurs faisceaux laser, réalisant une mesure de distance en profondeur pour chaque pas angulaire. Les modèles de balayage sont fixés par l'application visée. Les motifs de balayage spécifiques sont accessibles et mettent en œuvre différents éléments optiques de déviation tels que des prismes, des réseaux ou des miroirs. De nombreux LiDAR 3D automobiles balayent un cercle et utilisent un simple miroir à rotation continue. Afin de fournir une plus grande couverture, plusieurs faisceaux (jusqu'à 128) peuvent balayer l'espace en même temps comme proposé par les sociétés Velodyne ou Ouster.



15^{ème} Optatec

Salon International des technologies et de la fabrication de composants et systèmes optiques

 **Du 18 au 20 octobre 2022**

 **Francfort**

excellent optical technologies

- Sous-ensembles optiques
- Optomécanique / Optoélectronique
- Fibres optiques et guides d'ondes lumineuses
- Composants et systèmes laser
- Systèmes de fabrication




 www.optatec-messe.de

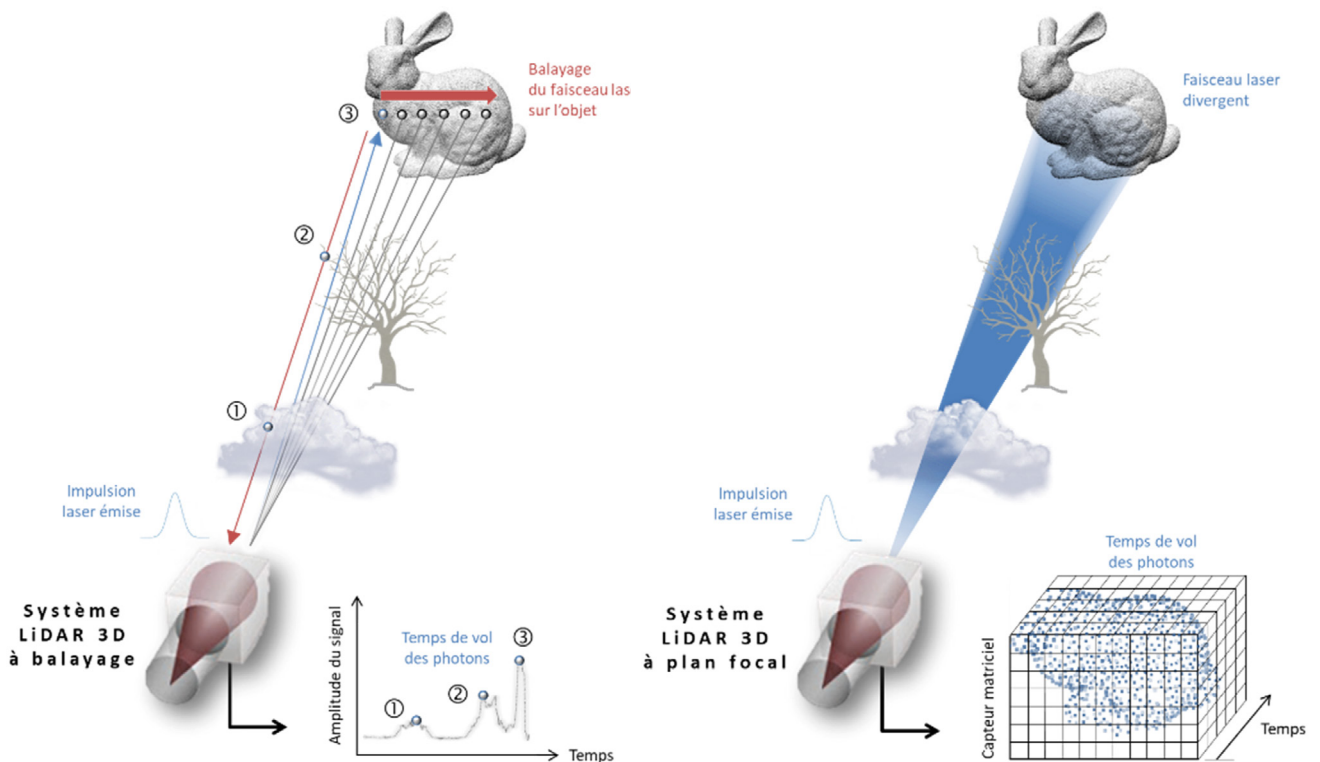
 **#optatec2022**     

Organisateur:

 **P. E. SCHALL GmbH & Co. KG**

 **+49 (0) 7025 9206-0**

 optatec@schall-messen.de



Pour des champs de vue plus étroits (ex. 30×60 degrés pour Neptec), une paire de prismes de Risley à rotation continue à vitesses différentes pour générer un balayage de type « rosette » est privilégiée pour fournir une couverture rapide et plus grande. Certains produits permettent de programmer dynamiquement des motifs de balayage comme proposé par la société Arete. Le temps de numérisation dépend de l'étendue de la zone à couvrir, de la méthode / motif de balayage et des limites mécaniques du scanner. En général, ces systèmes ont des taux de rafraîchissement de l'image de l'ordre du Hertz. Les LiDAR 3D dits Flash tels que ceux produits par ASC ont la particularité de couvrir de larges champs de vue avec une unique impulsion (faisceau laser divergent). Ils mettent en œuvre des détecteurs multipixels (plans focaux matriciels) avec une information télémétrique intégrée. Les fréquences de fonctionnement sont plus élevées que les systèmes LiDAR à balayage sans utiliser de pièce mécanique mobile. L'inconvénient reste l'énergie nécessaire lors de la génération

Figure 1. Schémas de principe de la mesure de télémétrie à l'aide de systèmes LiDAR 3D à balayage et à plan focal.

Figure 2. Test de navettes autonomes EZ10 du français EasyMile au CEA à Saclay par la RATP.

de chaque impulsion, réduisant ainsi la portée effective du système pour satisfaire les contraintes de sécurité oculaire. D'autre part, la résolution est souvent limitée et fixe, avec des plans focaux bénéficiant d'une centaine de milliers de pixels.



De nos jours, il est courant d'atteindre des fréquences d'acquisition dynamiquement ajustables qui dépassent les 25 kHz (application longue portée) voire les 200 kHz (application courte portée). Notons que la plupart des LiDAR 3D sont conçus historiquement pour des applications robotiques opérant par temps clair et en intérieur. Certains systèmes (Neptec, Arete) sont spécifiquement conçus pour maintenir la fonction de perception par faible visibilité, en présence d'obscurants sur la ligne de visée. L'ONERA s'est associé à l'entreprise EASYMILE et au CNRS-LAAS pour estimer les performances des systèmes LiDAR 3D en présence de conditions météorologiques dégradées. La diffusion et l'absorption du faisceau laser par les aérosols et les hydrométéores présents sur la ligne de visée augmentent le nombre d'échos parasites et diminuent le rapport signal

sur bruit. *In fine*, la portée globale du LiDAR est limitée. Ces variations sont fortement dépendantes de l'environnement direct du véhicule autonome et doivent être considérées pour adapter la réactivité des systèmes de perception et de navigation [02]. L'analyse de la distribution spatiale des échos retour (y compris les échos parasites reliés aux événements de diffusion sur la ligne de visée) permet d'estimer les conditions météorologiques et d'adapter la vitesse d'un véhicule ou ses distances de freinage. La plupart des LiDAR sont développés pour des applications inférieures à 2 km. S'il est nécessaire d'augmenter leurs distances de travail, une attention particulière est portée sur la puissance de la source laser, la sensibilité du détecteur et la prise en compte de l'atténuation atmosphérique (incluant atténuation et phénomènes de diffusion par les aérosols). La

plupart des LiDAR 3D du commerce utilisent des détecteurs à réponse linéaire. Cette approche autorise la mesure de plusieurs échos retour sur une ligne de visée générés par une seule impulsion. Les détecteurs fonctionnant en mode Geiger sont plus sensibles et permettent la détection d'un photon unique. Ils sont limités, le plus souvent, à la détection d'un seul écho retour par impulsion. Ce type de LiDAR 3D à mode Geiger est souvent privilégié pour des applications longue portée ou pour des applications nécessitant une forte sensibilité et une détection statistique du faible nombre de photons revenant vers l'instrument après, par exemple, le passage de milieux obscurants [03]. Nous avons vu précédemment que l'utilisation de LiDAR 3D pour les véhicules autonomes stimule fortement leur développement. La maîtrise des coûts dictée par ●●●



**CONÇU POUR MESURER.
TOUS LES LASERS. PARTOUT.**

micronora
microtechniques & précision

Venez nous rendre visite dans le Hall C, Stand 410

Connaissez votre faisceau laser: Puissance, Energie, Profil & Caustique

- La plage de mesure la plus étendue
- Du fW à plus de 100 kW – du EUV au FIR
- Mesures dynamiques et en temps réel
- Solutions standard et OEM

- Plus de 40 ans d'expérience
- Présence globale
- Développements spécifiques aux besoins clients
- Service de calibration mondial





Appelez-nous +33 6 01 01 27 32
ou visitez www.ophiropt.com/photonics



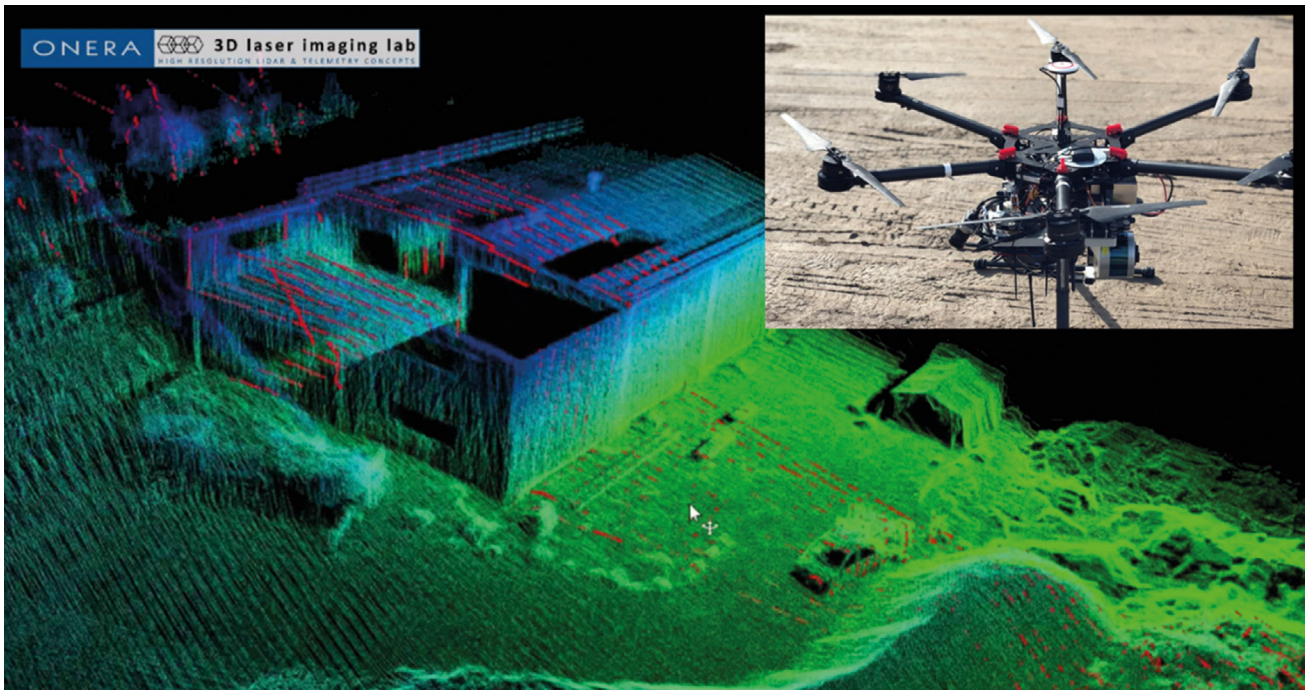


Figure 3. Nuage de points obtenu avec un LiDAR 3D embarqué sur drone et transmis en temps réel à un opérateur situé à plusieurs kilomètres de distance pour des applications de sûreté.

ce domaine d'application impose une portée réduite et inférieure à 500 m, un traitement par temps de vol simple, un rafraîchissement de l'image 3D *via* de multiples faisceaux laser et une utilisation à privilégier par temps clair. Ces systèmes LiDAR 3D sont généralement considérés comme commercialement prêts à l'emploi et n'ont pas de paramètres ajustables par l'utilisateur.

IMAGERIE LASER 3D EMBARQUÉE SUR VÉHICULES AUTONOMES

Les méthodes classiques de traitement d'images passives estiment les distances entre objets dans une scène à partir de données acquises par des détecteurs matriciels (deux dimensions). De nombreux progrès ont été réalisés ces dernières décennies dans la perception par caméras passives à bas coût. Cependant, cette approche reste perfectible en précision lors de l'estimation des distances notamment pour des solutions non-stéréo dites monoculaires. Les LiDAR 3D sont des systèmes actifs constitués entre autres par un bloc détecteur colocalisé avec une

source laser. La télémétrie précise des objets est obtenue par traitement des échos « retour » après réflexion sur les surfaces éclairées par le faisceau laser.

Actuellement, de nombreux véhicules autonomes haut de gamme mettent en œuvre des systèmes LiDAR 3D couplés au système de perception malgré leur coût élevé et la présence de pièces mobiles souvent décriées pour des applications embarquées. Plusieurs projets sont conduits dans différents pays comme par exemples le projet Paris2Connect [04] et les essais opérationnels réalisés dans la région de Paris-Saclay (projet EVAPS) [05] où plusieurs entreprises (Easymile, RATP, Institut Vedecom, Renault, Transdev) collaborent pour exploiter des services d'éco-mobilité basés sur les véhicules autonomes. En

complément de l'aspect système, il est important de considérer les algorithmes de traitement du signal LiDAR 3D dont les développements sont en pleine expansion. Pour un véhicule autonome, les LiDAR sont principalement utilisés pour la perception et la localisation précise. Du point de vue de l'utilisateur, la sortie d'un système de perception doit comprendre les trois niveaux d'informations suivants : (i) une description physique de la pose, de la vitesse et de la forme des objets en présence, (ii) une description sémantique de la scène par classes d'objets et (iii) une prédiction ou probabilité de comportement pour les objets dynamiques. La société EasyMile est un leader mondial en matière de solutions de mobilité intelligentes et de technologie sans chauffeur. Elle développe des logiciels pour automatiser les plateformes de transport notamment pour l'acheminement des passagers (projet EZ10) et des marchandises (projet TractEasy pour le transport de bagages sur aéroport). En environnements contrôlés, il est alors possible de

retirer l'opérateur de sécurité. Les véhicules en opération (niveau 4 de conduite autonome) gèrent la majorité des situations de conduite de manière indépendante. Basé sur des outils de *deep learning*, les véhicules anticipent la route et reconnaissent les comportements des autres usagers. Plusieurs familles de capteurs cohabitent au sein de l'architecture système (radars, caméras et capteurs LiDAR 3D de nouvelle génération). La perception de l'environnement dans lequel évolue le véhicule est réalisée en temps réel à 360 degrés. Les LiDAR 3D sont utilisés pour la détection, la classification, le suivi et la prédiction de comportement des objets, ce qui correspond aux trois couches d'informations du système de perception. Les informations fournies par un LiDAR sont considérées comme étant plus fiables que celles fournies par une caméra en raison de la précision télémétrique et de l'accès natif à la forme géométrique des objets. Notons qu'à l'instar des véhicules terrestres, l'ONERA a embarqué différents systèmes LiDAR 3D sur des drones à des fins de recherche. La figure 4 illustre

la géométrie 3D d'un bâtiment survolé par un drone léger (type DJI S900) équipé d'un LiDAR Velodyne. Les données sont transmises en temps réel à un opérateur qui se situe à plusieurs kilomètres du site d'essai. Les données sont géoréférencées et traitées à bord de la plateforme drone pour limiter le flux du transfert d'information. Ces données contextuelles peuvent être directement exploitées par un système de navigation autonome du drone et transmises à un opérateur à des fins de contrôle ou de surveillance [06].

SYNTHÈSE

Contrairement à la photogrammétrie, les LiDAR 3D améliorent la reconnaissance d'obstacles à courte portée pour la navigation autonome de véhicules terrestres / aériens et répondent aux besoins en imagerie télémétrique en condition de visibilité dégradée. L'accroissement de la portée des LiDAR 3D et de leur robustesse face à un environnement dégradé (par exemple faible visibilité météo) ainsi que la réduction de l'encombrement et des coûts de fabrication sont des défis importants pour l'avenir. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. L. Leonard, *J. Field Robot.* 25(10), 727-774 (2008), <https://doi.org/10.1002/rob.20262>
- [2] K. Montalban, C. Reyman, D. Atchuthan, P-E. Dupouy, N. Riviere, S. Lacroix, *Atmosphere* 12, 738 (2021), <https://doi.org/10.3390/atmos12060738>
- [3] N. Riviere, G. Anna, L. Hespel *et al.*, "Modeling of an active burst illumination imaging system: comparison between experimental and modelled 3D scene," *Proc. SPIE 7835, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IV*, 783509 (2010), <https://doi.org/10.1117/12.864694>
- [4] La RATP se rapproche de Vedecom pour tester des véhicules autonomes et des routes connectées, <https://www.usine-digitale.fr/article/la-ratp-se-rapproche-de-vedecom-pour-tester-des-vehicules-autonomes-et-des-routes-connectees.N829860>
- [5] Projet EVAPS (Eco-mobilité par Véhicules Autonomes sur le territoire de Paris-Saclay), <http://www.paris-saclay.com/fonctionnalites/actualites-109/des-vehicules-autonomes-testesa-paris-saclay-3156.html?cHash=3b8f29a3e9f2843287a002d6824d4144>
- [06] G. Athanasiou, A. Amditis, N. Riviere, E. Makri, A. Bartzas *et al.*, "INACHUS: Integrated wide area situation awareness and survivor localisation in search and rescue operations", 5th International Conference on Earth Observation for Global Changes (EOGC) and the 7th Geoinformation Technologies for Natural Disaster Management (GIT4NDM), UAE (2015)

A FUTURE NEEDS THE PAST

After 40 successful years, we are re-inventing the brand.



Discover at
lasercomponents.com