

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES
FOR 3D LASER SCANNING OF OBJECTS⁶**

Assist. Prof. Ivanka Tsvetkova, PhD

Department of Telecommunications,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 836
E-mail: itsvetkova@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Plamen Zahariev, PhD

Department of Telecommunications,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 663
E-mail: pzahariev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Georgi Hristov, PhD

Department of Telecommunications,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Phone: 082 888 663
E-mail: ghristov@uni-ruse.bg

***Abstract:** A 3D scanner is a device that analyses a real-world object or environment to collect data on its shape and possibly its appearance. The collected data can then be used to construct digital three-dimensional models, which can be processed and analysed. The final products of this digital scanning method are sets of point clouds of varying densities and accuracies. Processing of these point clouds requires the use of specialized software, which can produce 3D meshes, 3D surface models and 3D rendered models of varying resolutions. With the evolution of the 3D scanning technologies, three main categories of 3D scanners have emerged. In this paper we present, analyse, discuss and compare the different technologies for 3D scanning and we provide real-life scenarios and case studies for the use of every one of them.*

***Keywords:** 3D scanning, 3D scanners, 3D technologies*

ВЪВЕДЕНИЕ

3D сканирането е технология за улавяне на формата на обект, използвайки 3D скенер. Резултатът е 3D файл на компютър, който може да бъде обработен или 3D отпечатан. Някои 3D скенери могат да събират едновременно форма и цветни данни. 3D скенерът е устройство, което използва комбинация от лазери, камери, светлина и сензори, за да преобразува реални обекти в дигитални модели или данни. Като се проектира светлина върху обект и след това се запомнят данните от приетата светлина като снимки от известни ъгли, 3D скенерите математически могат да триангулират координатите по цялата повърхност на обекта. Резултатът от това действие е облак от точки, който може да се използва за обратно инженерство, виртуално сглобяване, инженерни анализи, функционални и повърхностни инспекции или бързо прототипиране. Този метод по същество е еднакъв за всички 3D скенери, но има различни начини 3D данните да се приемат, в зависимост от метода на проектиране на светлината. 3D скенерите могат да се класифицират според технологиите, които използват: сканиращи устройства с изместване (използват единичен лазерен лъч), скенери с линеен профил (използват проектиране чрез лазерна линия) и скенери за моментни

⁶ Докладът е представен на научна сесия на 26 октомври 2018 с оригинално заглавие на български език: СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИИ ЗА 3D ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ НА ОБЕКТИ

снимки (използват структурирана светлина от проектор) (Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., Valanis, A., 2010).

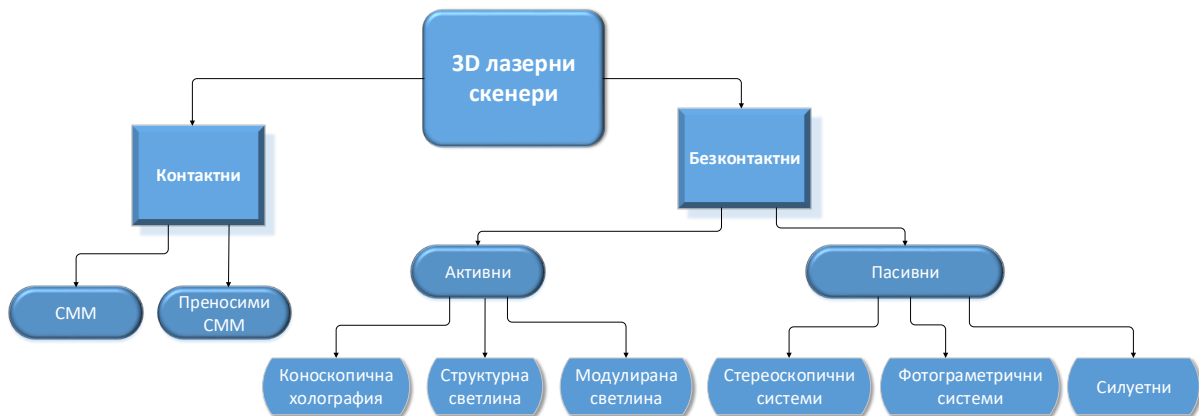
АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗА 3D ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ НА ОБЕКТИ

Съществуващите технологии се разделят на три основни групи: контактни, безконтактни и измерителни. За всяка от тях има по няколко под вида, както е показано на фиг. 1.



Фиг. 1 Класификация на технологиите за 3D лазерно сканиране

За всяка от технологиите са подходящи различни скенери. Класификацията им е показана на фиг. 2.



Фиг. 2 Класификация на 3D лазерните скенери

Контактни технологии

3D контактните скенери, обикновено са калибрани за работа на неподвижна платформа, често съдържат сонда, разположена в края на шарнирно механичното рамо. Докато сондата контактува с повърхността на обекта, скенерът записва позициите X, Y, Z на сондата, като извършва позиционни измервания на обекта. Записаните позиции образуват облак с точки от данни, който може да се използва за изчисляване на 3D мрежа. Координатните измервателни машини (Coordinate Measuring Machines - CMM) често се използват от промишлеността за проверка на части с цел ранно откриване на проблеми (Ebrahim, M. A.-B., 2015). Контактните технологии се разделят на традиционни, портативни и многосензорни. Примерни скенери от тези видове са показани на фиг. 3.



Фиг. 3 СММ: а) традиционен (<http://www.globalspec.com>), б) портативен (<http://www.globalspec.com>) и в) многосензорен скенер (<http://www.directindustry.com>)

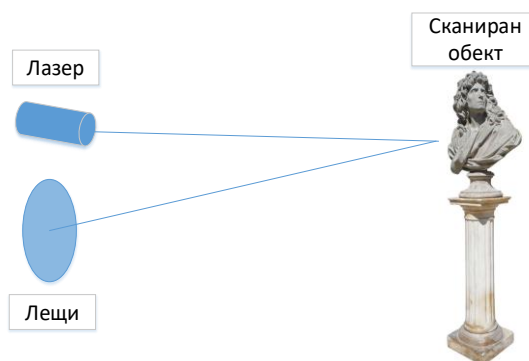
Безконтактни технологии

Безконтактните 3D скенери не правят физически контакт с повърхността на обекта. Вместо това те разчитат на някои активни или пасивни технологии за сканиране на обект (Ebrahim, M. A.-B., 2015).

1. Безконтактни активни технологии

Активните скенери излъчват някакъв вид радиация или светлина и откриват отражението ѝ, за да проучат обект или среда. Възможните видове емисии, които се използват, включват светлина, ултразвук или рентгенови лъчи (Yu, F., Lu, Z., Luo, H., Wang P., 2011). 3D лазерните скенери се класифицират в три основни категории, които обикновено се използват самостоятелно, но могат да се използват и в комбинация, за да се създаде по-гъвкава система за сканиране (Ebrahim, M. A.-B., 2015):

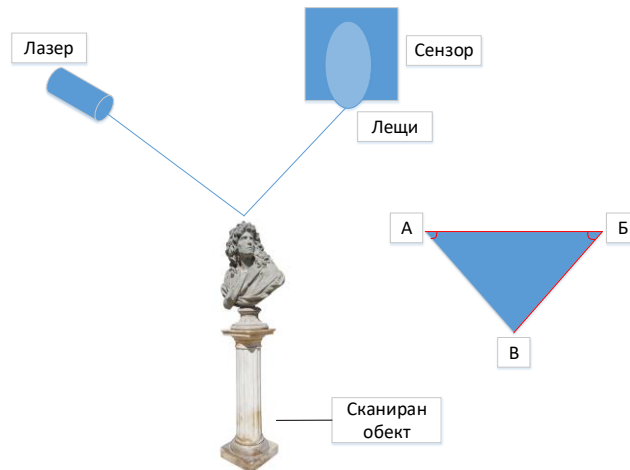
- *измерване на времето за отиване и връщане на светлината*: този метод се нарича още откриване на светлина и определяне на обхвата ѝ (Light Detection and Ranging - LIDAR). Импулсният скенер използва лазерна светлина за проучване на обекта, както е показано на фиг. 4. Той излъчва светлинен лазерен импулс, който се отразява от обекта на сканирането (Andriuskeviciute, I., 2010). Отразеният импулс се улавя от сензор. Времето, изминало от излъчването до улавянето на лазерния импулс, служи за изчисление на разстоянието между скенера и обекта, тъй като скоростта на лазерния лъч е известна.



Фиг. 4 3D сканиране чрез технологията измерване на времето за отиване и връщане на светлината

- *фазово отместване*: определя се фазовото отместване между изпратения и получения сигнал с определена дължина на вълната. Максималният обхват, който може да бъде измерен чрез определена модулация, е половината от модулационната дължина на вълната. (Abdelhafiz, A., 2009).
- *триангулация*: излъчва се лазер върху обекта и се използва камера за търсене на местоположението на лазерната точка. Тази техника се нарича триангулация,

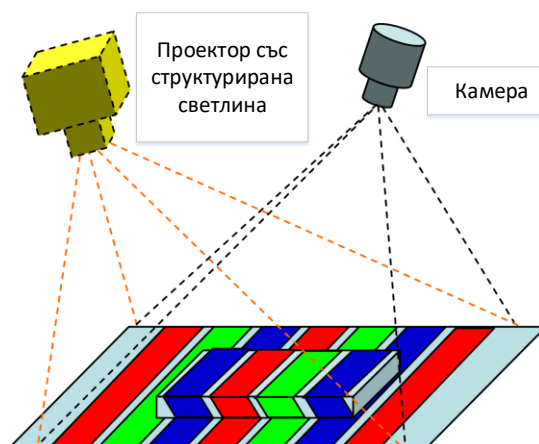
защото лазерната точка, камерата и лазерът образуват триъгълник, както е показано на фиг. 5. Дължината на едната страна на триъгълника, разстоянието между камерата и лазерния излъчвател са известни. Ъгълът на върха с лазерния емитер също е известен. Ъгълът на върха с камерата може да се определи, като се види местоположението на лазерната точка в зрителното поле на камерата. С тази информация се определят напълно формата и размера на триъгълника и дават мястото на лазерната точка, която е третият връх на триъгълника. В повечето случаи се използва лазерна лента, вместо единична лазерна точка, за да се ускори процеса (Andriuskeviciute, I., 2010).



Фиг. 5 3D сканиране чрез триангулация

Безконтактните активни 3D скенери включват лазерни скенери, структурирани оптични светлинни скенери, модулирани скенери, компютърни томографски скенери, скенери за магнитно резонансно изображение и др. (Ebrahim, M. A.-B., 2015):

- *Коноскопична холография*: в коноскопичната система се излъчва лазерен лъч върху повърхността и след това отражението по същата лъчева пътека през коноскопичен кристал се проектира върху CCD. Резултатът е дифракционен модел, който може да бъде анализиран, за да се определи разстоянието до измерената повърхност.
- *Структурирана светлина*: 3D скенерите със структурирано осветление проектират модел на светлина върху обекта и гледат деформацията на шаблона върху обекта. Моделът може да бъде едноизмерен или двуизмерен. Пример за едномерна структура е линия, както е показано на фиг. 6.



Фиг. 6 3D сканиране чрез технологията със структурирана светлина (Geng, J., 2011)

Линията се проектира върху обекта, като се използва LCD проектор или лазерен лъч. Камерата, леко изместена от проектора на шаблона, гледа формата на линията и използва техника, подобна на триангулацията, за да изчисли разстоянието на всяка точка от линията. В случай на модел с единична линия, тя се премества през зрителното поле, за да се събере информация за разстоянието на една линия наведнъж. Пример за двуизмерен модел е решетка. Използва се камера, за да се разгледа деформацията на модела, а алгоритъмът се използва за изчисляване на разстоянието във всяка точка на модела. Предимството е скоростта. (Liu, K., Wang, Y., Lau, D. L., Hao, Q., Hasebrook, L. G., 2010).

2. *Безконтактни пасивни технологии*

Безконтактните пасивни 3D технологии не облъчват обекта с енергия. Вместо това, пасивните 3D скенери разчитат на отразената околна светлина. Повечето скенери от този тип използват видима светлина, защото е лесно достъпна (Ebrahim, M. A.-B., 2015). Могат да се използват и други видове лъчения, като инфрачервеното (Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., Valanis, A., 2010). Технологията за подпомагане на потребителите (моделиране, базирано на изображение) се основава на принципите на фотограметрията (Ebrahim, M. A.-B., 2015). Безконтактните пасивни 3D скенери се разделят на (Ebrahim, M. A.-B., 2015):

- **Стереоскопични системи:** използват се две камери, които са насочени в една посока. Като се анализират разликите между снимките, направени от камерите, се изчислява разстоянието до всяка точка от снимката.
- **Фотограметрични системи:** използват само една камера, но се правят много снимки при различна осветеност. Инвертира се снимката на структурния модел с цел да се възстанови ориентацията на повърхността на всеки пиксел.
- **Силуетни техники:** използват очертания, създадени от последователност от фотографии около триизмерен обект срещу контрастен фон. Тези силуети се екструдират и пресичат, за да формират визуалната обвивка на обекта.

Измерителни технологии

Измерителните технологии се разделят на два подвида: медицински и индустриални. При компютърната томография, базирана на изображения, се генерира триизмерно изображение на вътрешната част на обект от много на брой двумерни рентгенови изображения. По подобен начин магнитното резонансно изображение е друга техника за медицинско изобразяване, която осигурява много по-голям контраст между различните меки тъкани на тялото, отколкото компютърната томография (Ebrahim, M. A.-B., 2015). Тези технологии създават дискретно 3D обемно изображение, което може да бъде визуализирано, манипулирано или преобразувано в 3D повърхност посредством алгоритми за извличане на повърхността. Компютърната томография, микротомография и ЯМР се използват най-често в медицината, но намират приложение и в други области за постигане на цифрово представяне на обект и неговата вътрешност, като например неразрушаващ се материал за тестване, обратно инженерство или изследване на биологични и палеонтологични екземпляри.

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА 3D ЛАЗЕРНО СКАНИРАНЕ НА ОБЕКТИ

3D контактните скенери имат следните недостатъци - бавни скорости на сканиране и може да не са подходящи при сканиране на деликатни предмети, като ценни произведения на изкуството, тъй като физическият контакт може да повреди или деформира повърхността. Предимствата на СММ са:

- Един от най-точните начини за измерване на обект;
- Малките до големи части могат да бъдат измерени с подходяща машина;
- Съществуват промишлени стандарти и сертификати за измервания и софтуер;

- Много модели и размери се предлагат от различни производители.

Предимствата на 3D скенерите с рамо и системи за проучване са: преносима система; добра точност при малки и средни по големина части; възможност за проучване и сканиране на отделна част.

Различните безконтактни технологии са подходящи при сканиране на обекти, които са разположени на различно разстояние:

- Малко разстояние (фокусно разстояние по-малко от 1 м): подходящи 3D скенери за малък обхват са тези, които използват триангулация и структурирана светлина. Сравнение между тези технологии е дадено в таблица 1.

Таблица 1 Сравнение на технологии, подходящи за малък обхват

Технология	Предимства	Недостатъци
Лазерна триангулация	много видове скенери; преносими; по-малка подготовка; по-малко чувствителни към околната светлина; подходяща за блестящи или тъмни покрития	по-малка точност; по-ниска резолюция; по-висок шум
Триангулация с шаблон върху повърхността	по-точна; по-висока разделителна способност; по-малко шум	само скенер на повърхнина; не са толкова малки и преносими; по-чувствителни към повърхността на обекта; изискват подготовка и специфично осветление

- Средни и дълги разстояния (по-голямо от 2 метра фокусно разстояние): Подходящите технологии са измерване на времето за отиване и връщане на светлината и фазово отместване, които са подходящи при сканиране на големи обекти като сгради, конструкции, самолети и военни превозни средства. Предимствата на 3D скенерите с голям обхват са: сканиране на милиони точки в едно сканиране; голяма площ за сканиране до 1000 метра; добра точност и разделителна способност въз основа на размера на обекта; преносими; безконтактни, следователно сканирането е безопасно за сканираните обекти. Сравнение между тези технологии, е дадено в таблица 2.

Таблица 2 Сравнение на технологии, подходящи за среден и голям обхват

Технология	Предимства	Недостатъци
Измерване на времето за отиване и връщане на светлината	средни и дълги разстояния (2 м - 1000 м)	по-бавно събиране на данни; по-висок шум
Фазово отместване	по-точна; по-нисък шум; по-бързо събиране на данни	само средни разстояния

Предимството на 3D скенерите, използващи измерване на времето за отиване и връщане на светлината, е, че те могат да работят на много дълги разстояния (на километри). По този начин тези скенери са подходящи за сканиране на големи конструкции като сгради или географски характеристики. Недостатъкът им е тяхната точност. Благодарение на високата скорост на светлината отчитането на времето за отиване и връщане е трудно и точността на измерването на разстоянието е ниска, около милиметър. 3D скенерите, които използват триангулацията, имат ограничен диапазон от няколко метра, но тяхната точност е висока, около десетки микрометри. Точността на скенерите, използващи времето за отиване

и връщане на светлината, може да бъде влошена, когато лазерният лъч достигне края на обект, защото информацията, която се изпраща обратно на скенера, е от две различни места за един лазерен импулс. Координатите, отнасящи се до позицията на точка, която е в края на даден обект, ще бъдат изчислени въз основа на средна стойност и следователно ще поставят точката на грешното място. При сканиране с висока резолюция, когато лъчът достигне края на обекта, получените данни показват наличие на шум точно зад края на обекта. Скенери с по-малка ширина на лъча ще помогнат за разрешаването на този проблем, но ще бъдат ограничени по обхват, тъй като ширината на лъча ще се увеличи с увеличаване на разстоянието. Използването на подходящ софтуер също може да помогне за разрешаването на този проблем. Технологиите с фазово отместване дава точни разстояния, но само при среден диапазон. Използването на технологиите със структурирана светлина намалява или елиминира проблема с изкривяването от движение. Безконтактните пасивни технологии могат да бъдат много евтини, защото те не се нуждаят от специален хардуер в повечето случаи.

Основното предимство на коноскопичната холография е, че за измерването е необходим само един лъчев път, като по този начин дава възможност да се измери например дълбочината на фино пробита дупка. При силуетните техники вдлъбнатини на обекта (като вътрешността на купа) не могат да бъдат открити. Тези скенери са по-малко точни от фотограметричните.

В някои случаи контактните скенери не са подходящи. Например, ако обектът е еластичен, деликатен или по друг начин труден за сканиране, структурираното светлинно сканиране може да се използва без да се докосва повърхността на обекта. Тъй като проектират много светлинни точки едновременно, скенери със структурирана светлина за осветление работят с голяма скорост и прецизност в сравнение с някои други методи за сканиране. Тази ефективност е една от причините този вид сканиране да стане по-често срещано. Сканиране със структурирана светлина може да се използва и при микро мащаба, както и при големи обекти като самолети, което го прави една от най-гъвкавите технологии за триизмерно сканиране. Видът структурирано осветление, който трябва да се използва, зависи от характеристиките на повърхността, като отразяване, прозрачност и грапавост. В някои случаи структурираната светлина не е подходящ метод, тъй като дифракцията и отразяването могат да повлияят на измерванията. Предимствата на 3D сканирането със структурирана светлина са, че скенерите сканират по-голяма повърхност, с висока резолюция, много точни, преносими, безопасни за очите на хора и животни и попадат в различни ценови класове от нисък до висок в зависимост от разделителната способност и точността.

LIDAR технологията е подходяща при измервания на открито. Намира приложение в земеделието, строителството и геодезията, екомониторинг, при създаване на железопътни карти, магистрали или пътни мрежи и т.н.. На закрито са подходящи технологиите, които използват триангулацията. Технологията със структурирана светлина е подходяща при сканиране на стационарни обекти, докато триангулацията може да се използва при сканиране на движещ се обект.

ИЗВОДИ

В статията са анализирани и сравнени технологиите за 3D сканиране на обекти. Предимствата на 3D сканирането са - бързо заснемане на всички физически измервания на всеки физически обект; спестява време в дизайнерската работа, заснемане на инженерни оптимизации, използва модерното производство на части. Основно технологиите се разделят на контактни и безконтактни, като първите са много по-точни, но неприложими в много случаи, понеже могат да повредят обектите. Друг недостатък на традиционните измервателни машини е, че са стационарни. Той е отстранен при портативните СММ. Техният основен недостатък е отстранен при следващото поколение, известно като безконтактно сканиране, включващо високоскоростна лазерна единично точкова

триангулация, лазерно сканиране с линия и сканиране с бяла светлина. 3D скенерите, използващи безконтактни технологии, са портативни, точни и с висока разделителна способност. Използваните технологии при безконтактното 3D сканиране са подходящи за различни разстояния. Технологиите за 3D сканиране, заедно с новите инструменти за моделиране, позволяват високо възпроизвеждане на различни обекти като произведения на изкуството, които могат да бъдат приложени или за документирани на възстановяването им, или за реализиране на 3D архиви и виртуални музеи. Освен това, като се започне от цифровия модел с висока разделителна способност на даден обект, по-нататъшна стъпка може да бъде възпроизвеждането му чрез бързи техники за създаване на прототипи, както и 3D принтирането. 3D скенерите трябва да се усъвършенстват за по специфични случаи като блестящи или поглъщащи светлината обекти, но с напредването на технологиите, вероятно и този недостатък ще бъде отстранен скоро.

Скенерите за тяло се използват все по-често в широк спектър от приложения. Първоначално са разработени за модната индустрия като бързо и точно решение за 3D измерване, 3D скенерите за тяло сега се използват в различни области като здравеопазване, 3D фигурки или автопортрети и 3D снимки, фитнес или развлечения, например за създаване на 3D аватар. Друго приложение на 3D технологиите е при качествения контрол на поточните линии чрез автоматизирано триизмерно сканиране, използващо роботизиращо рамо. Благодарение на бързата скорост на заснемане на тази технология, тя е много подходяща за проверки за качествен контрол. Следващото предизвикателство за триизмерно сканиране е как най-добре да се включи изкуствения интелект, за да се добавят нови възможности към технологията.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper reflects the results received during the implementation of Project №2018-FEEA-02, funded by the Scientific and Research Fund of the University of Ruse "Angel Kanchev". The study was financially supported by the University of Ruse "Angel Kanchev" contract №BG05M2OP001-2.009-0011-C01, "Support for the development of human resources for research and innovation at the University of Ruse "Angel Kanchev"", which is funded with support from the Operational Program "Science and Education for Smart Growth 2014 - 2020" financed by the European Social Fund of the European Union.

REFERENCES

- Abdelhafiz, A. (2009). *Integrating Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning*. Ph.D Dissertation, Nr 23, Braunschweig, ISBN 3-926146-18-4
- Andriuskeviciute, I. (2010). *Comparison of Short Range and Long Range Laser Scanner's Accuracy Differences*, Bachelor Project
- Ebrahim, M. A.-B. (2015). 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *International Journal of Science and Research*, 4(10), 323-331
- Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3(2), 128-160
- Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., Valanis, A. (2010). *Assessing the Performance of a Structured Light Scanner*. ISPRS 2010, UK, XXXVIII, Part 5, 250-255
- Liu, K., Wang, Y., Lau, D. L., Hao, Q., Hassebrook, L. G. (2010). Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement. *Optics Express*, 18(5), 5229–5244
- Yu, F., Lu, Z., Luo, H., Wang, P. (2011). *Three-Dimensional Model Analysis and Processing*. Springer Science & Business Media
- <http://www.directindustry.com/prod/tesa/product-24600-537905.html>
- http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/dimensional_scanners
- <http://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>