

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПЕРСПЕКТИВИТЕ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ФОТОГРАМЕТРИЧНИЯ И СТЕРЕОФОТОГРАМЕТРИЧНИЯ МЕТОДИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ В МАШИНОСТРОЕНЕТО И ИНДУСТРИАЛНОТО ИНЖЕНЕРСТВО

Мирослав Кокаларов¹, Николай Ангелов²

¹Технически университет-Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България,
e-mail: m.kokalarov@tugab.bg

²Технически университет-Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България,
e-mail: angelov_np@abv.bg

* Мирослав Кокаларов: m.kokalarov@tugab.bg

RESEARCH OF PROSPECTS FOR APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC AND STEREOPHOTOGRAMMETRIC METHODS OF MEASUREMENT IN MECHANICAL ENGINEERING AND INDUSTRIAL ENGINEERING

Miroslav Kokalarov¹, Nikolay Angelov²

¹Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria;

²Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria;

* Miroslav Kokalarov: m.kokalarov@tugab.bg

Abstract

The report examines the results of the team's research on the application of the photogrammetric method, from its beginnings to its modern applications for the measurement of small and large objects in the field of fine mechanics and technique. The theoretical foundations of the method are described, as well as its application for measuring deformations in mechanical structures and engineering equipment. The paper analyzes the key factors that have a significant influence on the accuracy of the measurements and the uncertainty budget. Typical errors that occur under specific conditions of operation of the method and concrete types of equipment are considered, such as recommendations are offered to minimize these errors. Particular attention is paid to the initial stage of using the stereophotogrammetric method for measuring large objects and deformations in mechanical engineering and industrial engineering. The main dependencies of the method are presented through the analysis of its constituent elements. According to the authors, this method has significant potential for future application in manufacturing processes. Purposes for continued research to improve the accuracy of the methods and expand their practical application have been determined. Recommendations are given regarding the main technical characteristics, equipment requirements and the application of the methods in a real working environment.

Keywords: photogrammetric measurement method, stereophotogrammetric measurement method, small objects, large objects, measurement, measurement errors, uncertainty budget, industrial photogrammetry, heavy engineering.

ВЪВЕДЕНИЕ

Земната фотограмметрия намира широко приложение в разнообразни научни области, както и като фотографски метод

за създаване на планове и карти. Нейното широко използване се дължи на значителните ѝ предимства спрямо други фотографски и картографски методи.

Фотограметричните методи за измерване (ФМИ) се отличават със съвременен подход и значителни перспективи за развитие, като предоставят широки възможности за автоматизация на всички измервателни процеси [11]. Земната фотограметрия на обекти на близки и далечни разстояния успешно се прилага в три основни направления:

а) фотографиране и създаване на цифрови модели на обекти, включително в машинното и индустриалното инженерство [2, 7, 13, 14];

б) изготвяне на мащабни фотографски планове във вертикална и хоризонтална проекции, приложими в тежкото машиностроене при производството на големи детайли и заваръчни конструкции [1, 5, 13];

в) Заснемане и измерване на малки и много малки части, които не могат да бъдат измерени с други методи, измервателни системи (ИС) или средства за измерване (СИ) [4, 8, 12, 13].

Съществени успехи са постигнати в определянето на грешките в бюджета на неопределеността при измерването на малки и много малки размери [3, 6, 15]. В последно време на пазара периодично се появяват ИС (измервателни проектори и измервателни микроскопи), които работят на принципа на разпознаване на образи. Въпреки това, високите им цени ги правят достъпни предимно за големи компании, което ограничава тяхната масова употреба в маломасабни производствени мощности.

ИЗЛОЖЕНИЕ

А. ДИСКУСИЯ

Класическият фотограметричен метод се базира на принципите на централната проекция и закономерностите, свързващи пространствените координати с изображението. Традиционният подход при численото картографиране използва измерените стойности на основата, координатите на изображението и хоризонталния паралакс [8, 9, 13]. Мащабът на транс-

формация, определен чрез коефициента на трансформация/мащабиране K_T , се установява чрез поне две референтни точки – естествени или изкуствени. Тези точки представляват предварително измерени разстояния с възможно най-висока точност чрез различни вече установени методи [3]. Точността на фотограметричния метод се доказва чрез анализа на стандартното отклонение в координатите на точките от перспективното изображение, прилагано според закона на Гаус за разпределение на грешките [10].

Деформациите на инженерните съоръжения и конструкции се дължат на структурни промени в материалите, причинени от външни сили (натоварване). Когато натоварването не надвишава границата на еластичност на материала, конструкцията възстановява първоначалната си форма след премахване на натоварването. При по-високи натоварвания обаче се наблюдават остатъчни деформации, а при прекомерно натоварване материалът може да се разруши, което води до структурни разрушения. Това явление засяга както сгради, така и машини и техните елементи. Фотограметричният метод за измерване се разглежда като приложим в тази област, особено при анализа на деформации [9].

Въз основа на апробация на метода във 2D вариант и използването на неспециализиран софтуер [4, 5] са идентифицирани основните източници на грешки. Сред тях се отличават фокусното разстояние на обектива – f , ъгловият диапазон – α , и разстоянието на фокусиране – a . Терминът „коефициент на трансформация“ – K_T характеризира зависимостта между тези два параметъра на обектива. Оказва се [3, 13], че „коефициент на трансформация“ – K_T зависи в по-голяма степен от разстоянието на фокусиране на обектива.

Точността при измерване на конструкции, инженерни съоръжения и елементи [6] се счита за приемлива, като се има предвид, че човешкото око има резолюция $\sim 0,1 \text{ mm}$ (или $100 \text{ }\mu\text{m}$) при наблюдение от разстояние $\sim 20 \text{ cm}$. На тази база

максималната грешка при измерването варира до 100 μm , което съответства на ширината на шриха на основната скала на шублера. Тази грешка може да се разглежда като кумулативна, произтичаща от неточно позициониране на маркерите по време на измерване с произволно избран софтуер.

Фотографската матрица, използвана в това изследване, „SONY Super CCD VHR“, има резолюция от 9,2 Mrx, като снимките се извършват с резолюция от 5 Mrx. Това определя приблизителния размер на реален пиксел от 3,1 μm . Измерванията са извършени на монитор „Samsung SyncMaster 795DF“ с резолюция 1024x768 px (96 dpi), при което един RGB пиксел има размери $\sim 0,2\text{ mm}$.

Теоретично, при идеални условия, линията на изображението може да се опише с ширина от 1 px (3,1 μm). Софтуерът позволява 200% увеличение, което удвоява размера на пиксела до 6,2 μm . При тези условия, теоретично описаната линия би имала ширина от 2 px, съответстващи на 200 μm на монитора. Реалната грешка при тези идеализирани обстоятелства е около 6 μm , но в действителност е невъзможно линията да бъде описана само с 1 px. Обикновено се описва с 2 - 3 съседни пиксела, което води до обща грешка в диапазона от 6 до 20 μm . За сравнение, максималната грешка на СИ с линейен нониус с константа $i = 0,02\text{ mm}$ е около 40 μm , което е много по-голяма стойност в сравнение с ФМИ.

Общата грешка може да бъде намалена до минимум чрез оптимално използване на възможностите на регистриращата матрица и качествен монитор. Средната абсолютна грешка при измерването е функция на разделителната способност на матрицата, качеството на обектива (включително сферични и хроматични аберации), фокусното разстояние и характеристиките на монитора, използван за измерване. Ясното визуализиране на контурите на измерваните обекти, както и точното съвпадение на геометричните оси на системата „обектив - матрица“ с

осите на обекта, също оказват влияние върху точността.

Методът е доказано приложим за измерване на деформации и разстояния в машиностроителни конструкции, като точността на измерването в стерео вариант [7, 9, 13] зависи основно от разстоянието на снимане и размера на снимачната база. Тези фактори трябва да се разгледат поелементно в бъдещи задълбочени изследвания.

Основният въпрос, на който трябва да се отговори, е: „Чрез какви механизми човек възприема обемността на околната реалност?“ Отговорът се крие в анатомията, неврофизиологията и офталмологията, които определят ключовите фактори за възприятие на обем:

- геометрична перспектива и познаване на реалните размери на обектите с достатъчно висока точност;
- въздушна перспектива;
- сенки и отражения;
- движение на обекта и на наблюдателя;
- акомодация на окото;
- бинокулярно зрение – наличие на две очи (когато мозъкът възприема и сравнява изображенията, получени от две очи).

Първите три фактора са основни в класическата фотография, докато киното акцентира върху движението. Бинокулярното зрение е ключово за създаването на стерео изображение [7, 9, 10, 13].

В индустриалната фотограметрия от особено значение са въпросите:

- как се свързва стерео изображението с реалното изображение на обекта при различни условия на заснемане?
- при какви условия се постига минимална грешка на измерване?
- как да се избере оптималната база за заснемане, за да се минимизира грешката?

Отговорите на тези и други въпроси предстои да бъдат задълбочено разгледани в бъдещи изследвания по настоящата тематика.

В. ОСНОВНИ ЗАВИСИМОСТИ В СТЕРЕОФОТОГРАМЕТРИЯА

Основните зависимости в стереофотограметрията се основават на няколко основни параметъра. Един от тях е базата на стереоснимката - L , измервана в метри (m). Друг критичен параметър е ъгловата разделителна способност на оптичната система - α , изразена в радиани (rad). За човек с нормално зрение и при стандартни условия на осветление, α обикновено е равно на $1/5000$ [5]. При използване на обектив с фокусно разстояние $f = 50$ mm за 35 mm филм или еквивалентен цифров обектив с висококачествена матрица и монитор, този параметър се подобрява до $\alpha = 1/1500$ rad.

Радиусът на стерео възприятието – R , може да бъде изчислен по следната формула:

$$R = \frac{L}{\alpha} \quad (1)$$

За нормално човешко зрение радиусът на стереовъзприятието е ~ 300 m. Разграничаването в дълбочина е способността да се открива разлика между две точки, които се намират на различни разстояния - S_1 и S_2 , където $S_2 > S_1$. Условието за разграничаване в дълбочина се описва с формулата:

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \geq \frac{1}{R} \quad (2)$$

Радиусът на бинокулярното възприятие представлява разстоянието до най-отдалечения обект, при което може да се различи, че този обект и безкрайно отдалечен обект не са на едно и също разстояние. Пример за такива обекти са облаците, луната или звездите, които се намират извън радиуса на стереовъзприятие и поради това не могат да бъдат възприети в обемно измерение. Формула 2 за разграничаване на разстоянието може да се преобразува в следната зависимост:

$$S_1 - S_2 \geq \frac{S_1 S_2}{R} \quad (3)$$

Това означава, че на разстояние от около 0,5 m човек е способен да различи дълбочина от около 1 mm. Терминът „Ъглов размер на основата“ описва съотношението между основата и разстоянието до заснетия обект. В класическата стереофотография този параметър обикновено варира между 0,01 и 0,1.

Способността за разграничаване в дълбочина зависи от произведението на нормалната разделителна способност и ъгловия размер на основата. Вследствие на това, възможността за разграничаване в дълбочина е значително по-ниска в сравнение с други измервателни показатели. Основните изводи от този анализ могат да се обобщят по следния начин:

- способността за разграничаване намалява пропорционално с увеличаването на разстоянието;

- способността за разграничаване в дълбочина намалява пропорционално на квадрата на увеличеното разстояние.

Изборът на базовото разстояние - B_l е ограничен от няколко важни фактора. Най-съществените от тях са разстоянието до обекта, който се заснема, и размерът на обекта. Методът е приложим както за макро (големи и много големи размери), така и за микро обекти (малки и много малки размери). За малките и много малки размери се използват допълнителни оптични устройства, като микроскопи и стереомикроскопи.

При измерването на големи и много големи обекти, може да се използва следната зависимост:

$$\frac{B_l}{S_B} - \frac{B_l}{S_D} \leq \frac{H}{15f} \quad (4)$$

Където B_l е базовото разстояние, m;

S_B – разстоянието до най-близката точка, m;

S_D – разстоянието до най-отдалечената точка, m;

H – Ширина на рамката (реалната ширина на рамката в случай на фотолента или ширината на матрицата в случай на цифрова снимка), mm;

f – Фокусно разстояние на обектива, mm.

За максималното базово разстояние се получава следната зависимост:

$$B_{lmax} = \frac{1 + \frac{S_B}{S_D}}{15 \frac{f}{H}} S_B \quad (5)$$

Тази зависимост е от особено значение при измервания на големи и много големи обекти. От друга страна, условието за минимално базово разстояние се определя от следната формула:

$$\frac{B_l}{S_B} - \frac{B_l}{S_D} \geq \frac{H}{1000f} \quad (6)$$

или

$$B_{lmax} = \frac{1 + \frac{S_B}{S_D}}{1000 \frac{f}{H}} S_B \quad (7)$$

Практическият опит показва, че при използване на формула (7) е необходимо да се заложи на значителен резерв, вариращ между 20 и 50%. При измервания на големи обекти се препоръчва да се избере V_{min} чрез емпиричното съотношение $1/(3f)$, а за много големи обекти $1/(5f)$, където f е фокусното разстояние на обектива (в милиметри), еквивалентно на 35 mm филм.

Когато този метод се прилага за малки и много малки обекти, възниква допълнително ограничение, което е необходимо да бъде взето под внимание - съотношението между дължината на основата и работния диаметър на обектива. Работният диаметър на обектива се определя, като фокусното разстояние се раздели на номера на диафрагмата.

Изискването базовото разстояние да бъде няколко пъти по-голямо от работния диаметър на обектива произтича от факта, че предната и задната граница на дълбочината на остротата трябва да бъдат няколко пъти по-големи от разстоянието, което стерео снимката показва в дълбочина [10, 13]. В идеалния случай, ако

съотношението между основата и работния диаметър на обектива надвишава 30, то няма практическо значение, тъй като броят на базовите равнини се определя от способността за разграничаване на оптичната система. Ако обаче дълбочината на остротата и базовото разстояние са достатъчни за конкретната част, това съотношение не ограничава възможността за заснемане.

Обратно, при случаи на по-малки пропорции между основата и работния диаметър, съществува вероятност дълбочината на остротата да не е достатъчна или основата да е твърде малка, за да изрази необходимата дълбочина на фокуса. Това явление се среща особено често при макрофотографията, когато обектите са твърде малки, за да се постигне достатъчна разделителна способност на дълбочината на изображението.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършеното изследване обосновава приложимостта на фотограметричните и стереофотограметричните методи за измерване (СФМИ) в инженерните науки и практика, като демонстрира високата им точност и адаптивност при различни условия и размери на измерваните обекти. Анализът показва, че с правилно подбрана оптична система, базово разстояние и софтуерни инструменти, тези методи могат да се използват успешно за измерване на малки, средни и големи обекти, както и за определяне на деформации в конструктивни елементи.

Заключенията подчертават, че фотограметричните методи могат да бъдат особено полезни в индустриални условия, където прецизността на измерванията е от критично значение. Стереофотограметрията, с нейния 3D подход и способността за измерване в дълбочина, предлага нови възможности за мониторинг на инженерни съоръжения и конструкции в реални условия.

Това изследване също така подчертава значимостта на по-нататъшни изследвания, които ще позволят усъвършенстване

на методите, подобряване на точността и разширяване на тяхното приложение в по-широки индустриални сектори.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ

ФМИ и СФМИ демонстрират значителен потенциал за приложение в машиностроенето, особено при измерването на деформации, малки и големи размери на обекти и конструктивни елементи. Извършеното изследване показва, че класическите фотограметрични техники, основаващи се на закономерностите на централната проекция и пространствените координати, остават високоефективни за широк диапазон от инженерни приложения.

Едно от основните предимства на тези методи е възможността за автоматизация на измервателните процеси и използването на модерни оптични системи и неспециализиран софтуер, които повишават точността на измерванията. Възможността за значителна прецизност, особено при измерването на малки и много малки обекти, прави метода подходящ за уредостроенето, детайли и конструкции, които трудно могат да бъдат измерени с конвенционални измервателни уреди.

Допълнителен принос на изследването е дефинирането на ключови параметри като ъгловата разделителна способност на оптичната система и радиуса на стерео възприятие, които влияят върху точността на измерванията в стерео формат. Анализът показва, че правилният избор на базовото разстояние и съответното калибриране на оптичната система могат да сведат до минимум грешките при измерванията, като постигнат реална грешка в диапазона от 6 до 20 μm при определени условия.

СФМИ, с неговата способност за разграничение в дълбочина и триизмерно възприемане на обекти, се явява особено полезен за измерване на големи конструкции и детайли. Формулираните зависимости между базовото разстояние, фокусното разстояние на обектива и гео-

метричните характеристики на заснеманите обекти, осигуряват основа за постигане на максимална точност в стереоскопичните измервания.

БЪДЕЩИ ТВОРЧЕСКИ ПЕРСПЕКТИВИ

Следващата фаза на изследване трябва да се фокусира върху по-задълбоченото проучване на стереофотограметрията, особено в контекста на големи индустриални приложения, като тежкото машиностроене. Изследванията трябва да са насочени към оптимизиране на базовото разстояние и усъвършенстване на техниките за намаляване на грешките при измерването на големи конструкции и детайли със сложна геометрична конфигурация.

Разработване на по-достъпни и ефективни измервателни системи: Важно е да се продължат усилията за създаване на по-достъпни и високопрецизни измервателни системи. Възможностите за внедряване на стереофотограметрични методи в производствени процеси могат да бъдат значително подобрени чрез интеграция на по-ефективни софтуерни решения и оптимизация на съществуващите оптични технологии.

Приложение в нови индустриални сектори: Разширяването на приложението на фотограметричните методи в други инженерни области като авиокосмическата индустрия, автомобилостроенето и роботиката може да доведе до значителни подобрения в мониторинга на деформации и прецизното измерване на механични компоненти. Разработването на методологии за приложението на фотограметрията в тези сектори ще разшири потенциала ѝ и ще подобри технологичните процеси.

Интеграция с нови технологии: В бъдеще е необходимо да се обмисли интеграцията на фотограметрични и стереофотограметрични методи с технологии като изкуствен интелект (AI) и машинно обучение за автоматизация на измервател-

ните процеси и подобряване на анализа на данни. Тези технологии биха могли да направят измерванията още по-точни и ефективни, като намалят човешкия фактор и повишат надеждността на резултатите.

Интегриране на съвременни технологии: Препоръчва се внедряване на високорезолуционни цифрови камери, усъвършенствани оптични системи и специализиран софтуер за обработка на изображения. Изследването на възможностите на изкуствения интелект и машинното обучение може да допринесе за автоматизиране и подобряване на точността на анализа.

Разработване на достъпни измервателни системи: С цел преодоляване на финансовите бариери за малки и средни предприятия е необходимо разработване на по-икономични решения, които да предоставят висока точност без значителни инвестиции. Това може да включва използването на стандартно оборудване в комбинация с отворен код софтуер/свободен софтуер.

Мултидисциплинарни изследвания: Насърчаването на сътрудничество между специалисти в областта на оптиката, информатиката и инженерните науки може да доведе до иновативни решения и разширяване на приложния обхват на фотограметричните методи.

Стандартизация и нормативна уредба: Разработване на стандарти и протоколи за прилагане на фотограметричните методи в индустриални условия ще допринесе за повишаване на доверието и приемането им като надеждни средства за измерване.

Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Atanasov A., Sakakushev B.. (2012) Applications of the Photogrammetric Method of Measuring Macro and Microgeometry in Mechanical Engineering. Journal of the Union of Scientists Ruse, 1/2012. Series “Technical Sciences” № 5. ISSN 1311-106X. pp. 21 – 24;
- [2] Georgiev G. Georgieva N. (2014) Investigation of the Possibilities for the Use of Free Software for Data Processing Used for Accurate Measurement Details Through Photogrammetry, ARTTE Vol. 2, No. 3, 2014 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), pp. 202-210;
- [3] Georgiev G. (2016) Analysis of the Impact of Distance Between the Object and the Matrix of the Shooting Techniques on the Coefficient of the Transformation for Obtaining Dimensions Features by Photogrammetric Method, ARTTE Vol. 4, No. 4, 2016 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), DOI: 10.15547/artte.2016.02.08, pp. 285-290;
- [4] Georgiev G., Sakakushev B., Georgieva K. (2015) Examination of the Applicability of the Photogrammetric Method for Measuring Very Small Dimensions, Proceedings of the University of Ruse, 2015, Vol. 54, Series 2, ISSN 1311-3321, pp. 15-19;
- [5] Georgiev G., Sakakushev B. (2013) Examining the Possibilities of Application of Photogrammetry for Measurements in the Field of Machine Building. International Scientific Conference "Engineering, Technology, Education" ICTTE 2013, 30-31.10.2013, Proceedings ISSN 1314-9474, pp. 43-49;
- [6] Sakakushev B. Georgiev G., Zhelezarov I.. (2015) The First Steps for Building an Uncertainty Budget for Photogrammetric Measurements in Engineering Information Processing Systems, Kharkivskiy Universitet Povitryaniv Sil, 2015, Vol. 2, ISSN 1681-7710, pp. 54-57;
- [7] Sakakushev B., Grigorov V., Georgiev G. (2013) Method to Determine the Distance to the Site Using Stereophotometry. Theoretical and Practical Aspects of the Development of Modern Science. Materials from the VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, 29.06.2013/ Scientific and Informational Publishing Centre «Institute for Strategic Research». –

- Moscow: Izdatelstvo «Spetskniga», 2013. – 252 p. ISBN 978-5-91891-297-3, pp.77-80;
- [8] Sakakushev B., Georgiev G. (2016) Examination of the Applicability of the Photogrammetric Method to Measure Dimensions Smaller Than 2 mm. International Conference, Durres, Albania, 2016. Knowledge International Journal Scientific Papers, 2016. Vol.13.3, ISSN 1857-92, pp. 515-522;
- [9] Sakakushev B., Todorov T., Stefanov G. (2009) A Stereo Photogrammetric Method for Measuring the Deformations of Mechanical Structures. Journal of the Union of Scientists Ruse, 1/2009. Series “Technical Sciences” №5. ISSN 1311-106X, pp. 17-20;
- [10] Sakakushev B., Stoev S., Parvanov S.. (2007) Analysis of the Method of 3D Reconstruction in Calibrated Stereovision. Journal of the Technical University at Plovdiv “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 14, 2007;
- [11] Sotirov, B., Tonev D. (2013). Measurement Uncertainty of Simple Effective Diameter Using Measuring Wires. In “Materials Science, Hydro- and Aerodynamics and National Security”: Third National Conference with International Participation, 24-25.10.2013. Sofia, Bulgaria: Bulgarian Academy of Sciences, pp. 74-80;
- [12] Zhelezarov, I. (2005) Methods for Data Processing from Measurement and Testing with Small Sample Sizes. Radmi 2005. Vrnjacka banja, Serbia and Montenegro. 2005. ISBN 86-83803-20-1. pp. 562 – 565;
- [13] Sakakushev B, Parvanov S., Gueorguiev Tz., (2018) The Real Capabilities of the Photogrammetric and the Stereophotogrammetric Methods for Measurement in Mechanical and Manufacturing Engineering, IJAEDU-International E-Journal of Advances in Education, Vol. IV, Issue 11, September 2018;
- [14] Georgiev, Borislav; Karadzhov, Tsanko. Comparative Analysis of Geometric Deviations in Contact Measuring Instruments for Control and Laser Contactless Scanning. Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia, v. 3, p. 306310, 2024. DOI: 10.17770/etr2023vol3.7182;
- [15] Georgiev, Borislav; Karadzhov, Tsanko. Investigating The Repeatability Of 3D Printers Using a Multi-Sensor Measurement System. Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia, v. 3, p. 65–69, 2024. DOI: 10.17770/etr2024vol3.8114.