



## Original Paper

## Validation of Infrared Scanner by the Assistance of Geomatic Documentation of the Historical Building of Etemad al-Saltanah



Mohammad Sadegh Taher Tolou Del<sup>1</sup>, Sina Kamali Tabrizi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor as a Member of Architecture Group, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, IRAN

<sup>2</sup> Ph.D Candidate of Architectural Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, IRAN

Received: 04/09/2019

Accepted: 24/11/2019

### Abstract

Since the historical buildings undergo a lot of changes and damages in the course of history, they are required to be documented. These changes might come about as a result of natural symptoms like rainfall, wind, earthquake, flood, explosion and/or by human beings (consciously or unconsciously). Therefore, efforts should be made in line with 3D documenting such buildings so that, besides precise identification of the buildings' current status and the damages imposed to them during the time, the future changes and damages' trends could be predicted, so enables us to prevent their continuation. The documentation system is selected according to the dimensions of the object, the density of the required point clouds and accuracy. Regarding that the current methods for laser-based or photography-based (photogrammetry) 3D reconstruction are expensive or complex, cost-effective infrared sensors, such as the structure sensor and the Kinect sensor, have been introduced as promising alternative tools. An infrared scanner, as a portable depth-sensing scanner, consists of a color sensor and a depth sensor that are capable of capturing color images and depths of objects in the visible and accessible range. These sensors are commonly referred to as RGB-D cameras because they output standard RGB images from the camera that have an additional Depth channel per pixel (Fig. 2). The most recent development of the infrared documentation system is the portable Structural Sensor provided by Occipital in collaboration with Prime Sense. This small, lightweight, wireless sensor directly collects and records point clouds data and create three-dimensional modeling of interiors. Structure sensor is a new technology in metric documentation; therefore, the capabilities of this system have not been evaluated for documenting cultural heritage. According to the error introduced for the structure sensor, the scanner has a precision of more than 99% in objects between 0.4 and 3.5 meters; therefore, it is suitable for heritage documentation. The main purpose of this research is, therefore, to verify this claim based on projects captured through experimental tests, in order to confirm the suitability of this tool for cultural heritage documentation. The historical house of Etemad al-Saltanah was documented (Fig. 8) and processed to experimentally examine the structure sensor, the results of which were compared with the actual dimensions of the house (Table 4). Results of the research showed that this system of documentation is not suitable for 3D capturing and reconstructing historical buildings and does not have the required and claimed level of precision (Table 5). Also, the structure sensor precision was assessed for documenting museum objects through testing the scale model of Imam Mosque in Isfahan, Iran (Fig. 11). Results (Table 6) indicate that the structure

\* Corresponding author: [sina\\_kamali@yahoo.com](mailto:sina_kamali@yahoo.com)

sensor is only suitable for historical objects with dimensions between 0.3 and 2 meters, and has a precision of more than 95%, which is acceptable according to the Cadastral spatial information regulation. The number of point clouds varies between  $10^3$  and  $10^6$  points in each capture (Fig. 12) and the capture dimensions are achievable considering a root-mean-square error up to 5 m<sup>3</sup>, beyond which is higher than the capability of the scanner. Pearson correlation test showed increasing errors of the scanner with enlarged sizes of objects (Table 3).

**Keywords:** Remote Sensing, Point Clouds, Historical Buildings, Restoration, Conservation





## اعتبارسنجی اسکندر فرورسرخ به کمک مستندنگاری هندسی بنای

### تاریخی اعتمادالسلطنه

محمدصادق طاهرطلوع دل<sup>۱</sup>، سینا کمالی تبریزی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشیار عضو گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲. دانشجوی دکتری معماری، دانشکده مهندسی معماری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳

#### چکیده

از آنجایی که روش‌های فعلی برای بازسازی سه‌بعدی مبتنی بر لیزر یا مبتنی بر عکس (فوتوگرامتری)، گران‌قیمت یا پیچیده هستند، سنسورهای کم‌هزینه فرورسرخ مانند سنسور ساختاری و سنسور کینکت، وسیله‌ای امیدوارکننده برای جایگزینی معرفی شده‌اند. سنسور ساختاری برای مستندنگاری متریک، فناوری نوظهور محسوب می‌شود، به همین دلیل توانایی‌های این سیستم برای مستندنگاری میراث فرهنگی بررسی نشده است. همچنین بر اساس خطای معرفی شده برای سنسور ساختاری، اسکندر دقتی بالای ۹۹٪ در ابعاد اجسام بین ۰/۴ m تا ۳/۵ m دارد، لذا برای مستندنگاری میراث فرهنگی مناسب است. به همین منظور هدف اصلی این پژوهش اعتبارسنجی این ادعا بر اساس نمونه موردی‌های برداشت‌شده به صورت تجربی آزمایشی است تا مناسب بودن این ابزار برای مستندنگاری میراث فرهنگی تأیید شود. به عنوان بررسی تجربی آزمایشی سنسور ساختاری، خانه تاریخی اعتمادالسلطنه مورد مستندنگاری و پردازش قرار گرفته و نتایج به دست آمده از اسکندر با ابعاد واقعی خانه مورد مقایسه قرار گرفته است. لذا یافته‌های تحقیق بیان می‌دارد که این سیستم مستندنگاری، برای برداشت و سه‌بعدی سازی بناهای تاریخی مناسب نبوده و دقت لازم و مورد ادعا را ندارد. همچنین برای بررسی دقت سنسور ساختاری برای مستندنگاری آثار موزه‌ای، ماکت مسجد امام اصفهان مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد سنسور ساختاری تنها برای اجسام تاریخی با ابعاد بین ۰/۳ m تا ۲ m گزینه مناسبی محسوب می‌شود و دقت آن بالای ۹۵٪ است که بر اساس قوانین نقشه‌کشی کاداستر قابل قبول است. تعداد ابرنقاط در هر برداشت بین ۱۰<sup>۳</sup> الی ۱۰<sup>۶</sup> نقطه است و ابعاد برداشت با در نظر گرفتن خطای جذر میانگین مربعات تا ۵ m<sup>۳</sup> قابل انجام است و بیشتر از آن اسکندر قابلیت ندارد. آزمون همبستگی پیرسون نشان می‌دهد با بالا رفتن ابعاد سوژه خطا اسکندر به صورت فزاینده افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** سنجش از راه دور، ابر نقاط، بناهای تاریخی، مرمت، حفاظت

\* مسئول مکاتبات: تهران، لویزان، خیابان شهید شعبانلو، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، کد پستی: ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱

پست الکترونیکی: sina\_kamali@yahoo.com

«این نشریه با احترام به قوانین اخلاق در نشریات تابع قوانین کمیته اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیگیری می‌نماید.»

## ۱. مقدمه

از زمانی که روش‌های قابل‌اعتماد برای بازسازی سه‌بعدی امکان‌پذیر شد، پروژه‌های سه‌بعدی میراث فرهنگی نیز در سراسر جهان ظهور کرده است. مستندنگاری میراث فرهنگی به صورت دیجیتال یک منطق کاربردی است لذا توجه پژوهشگران و متخصصین حوزه حفاظت میراث فرهنگی به این فناوری در دو دهه گذشته، به صورت روزافزون بوده است. انگیزه اصلی عبارت است از؛ مستندنگاری فرم و ظاهر یک اثر، بنا و محوطه تاریخی به منظور حفظ اطلاعات در برابر حوادث طبیعی مانند: سیل، زلزله، آتش‌سوزی و غیره [1]، یا غیرطبیعی مانند: وندالیسم، سرقت، تخریب آثار تاریخی به صورت آگاهانه توسط اشخاص یا گروه‌های تروریستی و غیره [2]؛ فراهم کردن موزه‌های مجازی از طریق مجموعه رسانه‌های دیجیتال برای مخاطبان گسترده [3-5]؛ شناسایی و کنترل جعل آثار تاریخی، تأمین فرصت لازم برای محققین و پژوهشگران به واسطه‌ی مجموعه‌ای از اطلاعات هندسی به خصوص در شرایطی که دسترسی به آثار، بناها و محوطه‌های تاریخی دشوار است [3]؛ تدوین برنامه‌های آسیب‌شناسی، نگهداری، مرمت و اقدامات درمانی، پایش اثر تاریخی در درازمدت [4] و درنهایت ایجاد فرصتی برای انتقال داده‌های تاریخی به نسل‌های آتی است [5]. دیجیتالی و سه‌بعدی شدن آثار تاریخی نیاز به استانداردهای خاص خود دارد، لذا برای تحقق این امر، نیاز به تحقیقاتی برای مدل‌سازی سه‌بعدی از محتوای میراث فرهنگی ضرورت دارد [6]. در دو دهه گذشته در زمینه حفاظت دیجیتال میراث فرهنگی، ظهور سنسورهای عمق به ارتقاء کیفیت اطلاعات هندسی و رنگ‌های برداشته‌شده از اجسام در قالب ابرنقاط (Point Clouds) رنگی کمک کرده است. ساده‌ترین شکل مدل‌های سه‌بعدی مجموعه‌ای از مختصات سه‌بعدی است که از اسکن سطح یک شیء به دست می‌آید و به آن ابر نقاط گفته می‌شود [7]. هر نقطه از داده‌های ابر نقاط دارای موقعیت  $x$ ،  $y$ ،  $z$  منحصر به فرد است که از ترکیب داده‌های رنگی و داده‌های عمق ایجاد شده است [8]. برای تولید ابر نقاط و

مدل‌های سه‌بعدی از اجسام و بناهای تاریخی نیازمند استفاده و به‌کارگیری ابزارهای مستندنگاری هستیم. لذا در ابتدا شناخت این ابزارها اولویت دارد. انتخاب ابزار مناسب مستندنگاری به عوامل متعددی وابسته است که مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است (جدول ۱).

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، دستگاهی وجود ندارد که همه این ویژگی‌ها را هم‌زمان داشته باشد [11]. لذا ممکن است، برای بازسازی سه‌بعدی مجسمه‌های پیچیده و بزرگ، بناهای تاریخی، ترکیبی از سنسورهای مختلف استفاده شود. به‌عنوان مثال، بوک و همکاران [12] یک سیستم برداشت را ارائه داده‌اند که شامل چهار دوربین دیجیتال و دو اسکنر لیزری است و این سیستم توانایی بازسازی سه‌بعدی میراث معماری در یک منطقه وسیع تا ابعاد چند کیلومترمربع را دارد. در نمودار زیر، بر اساس پژوهش بلیک، توانایی سیستم‌های مستندنگاری متریک، برحسب ابعاد برداشت و تراکم نقاط برداشت ارائه شده است (شکل ۱).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تحقیقات جامع بلیک، به سیستم مستندنگاری فرسوخ (Infrared Scanner with Computational System Based on Triangulation) به علت اینکه فناوری نوظهور است، پرداخته نشده است. لذا بررسی سیستم اسکنر فرسوخ برای مستندنگاری متریک میراث فرهنگی با توجه در نظر گرفتن تراکم ابر نقاط و توانایی ابعاد برداشت اهمیت دارد.

## ۲. پیشینه پژوهش

اخیراً، موفقیت سنسورهای کم‌هزینه فرسوخ مانند مایکروسافت کینکت (Microsoft Kinect) [14] و سنسور ساختاری (Structure Sensor)، وسیله‌ای امیدوارکننده برای مدل‌سازی سه‌بعدی ارائه داده است، زیرا روش‌های فعلی مبتنی بر لیزر یا مبتنی بر عکس (فوتوگرامتری)، گران‌قیمت یا پیچیده هستند [15]. اسکنر فرسوخ به‌عنوان یک اسکنر سنجش عمق قابل‌حمل، از یک سنسور رنگی و یک سنسور عمق تشکیل شده است که قادر به گرفتن تصاویر رنگی و عمق تصاویر اشیاء موجود در محدوده قابل دید و دسترس هستند [16]. این سنسورها معمولاً به‌عنوان دوربین‌های RGB-D نامیده

جدول ۱: عوامل و ویژگی‌های مهم برای انتخاب سیستم مستندنگاری مناسب  
Table 1: Critical Factors and Properties for Choosing the Right Documentation System

| توضیحات<br>Description   | عوامل و ویژگی‌ها<br>Factors and Properties |
|--|--|
| دقت یک سنسور بر کیفیت برداشت یک اثر و ایجاد مدل نهایی شبه واقعی تأثیر بسزایی می‌گذارد [9]. کیفیت رابطه مستقیمی با وضوح و دقت ابر نقاط برداشت شده دارد.<br>۱- وضوح: با اشاره به توانایی تراکم نقاط برداشت شده است.<br>۲- دقت: اشاره به تغییرات آماری در میان اجسام ساکن و صحت اندازه‌های برداشت شده است [10].<br>The precision of a sensor affects the fidelity of the final model [9]. Quality has a direct relationship with the resolution and accuracy of the scanned point clouds.<br>Resolution. Referring to spacing of the samples.<br>Accuracy. Referring to the statistical variations among repeated measurements of a known value [10]. | کیفیت<br>Quality                           |
| هزینه سنسورها می‌تواند به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد. به‌عنوان مثال: سنسور کینکت مایکروسافت حدود یکصد دلار در حالی که اسکنر هوشمند بروکمن ده‌ها هزار دلار ارزش دارد. از آنجاکه بودجه سبدهی سازی دیجیتال می‌تواند محدود باشد این مسئله مهمی است که باید در نظر گرفت [9].<br>The cost of sensors can vary significantly. For instance: a Microsoft Kinect costs about one hundred dollars while a Breuckmann smart SCAN 3D-HE costs tens-of-thousands of Euro. Since the budget of digital preservation missions can be limited it is an important issue to consider [9].  | قیمت<br>Price                              |
| محدودیت‌هایی مانند عدم وجود برق و دسترسی راحت به فضای محوطه میراث فرهنگی از مشکلات رایج است. بنابراین چگونه دستگاه با این مشکلات مقابله می‌کند یک ویژگی مهم است [9].<br>Constraints such as absence of electricity and location accessibility are common problems for some cultural heritage sites. Therefore how the device deals with these issues is also an important question [9].  | قابل حمل بودن<br>Portability               |
| سایت‌های میراث فرهنگی زمان بازدید عمومی مشخصی دارند و می‌توانند تعداد زیادی بازدیدکننده و کارمندان محلی داشته باشند که محدودیت در زمان برداشت ایجاد می‌کند. در این میان وجود تنظیمات و قابلیت‌ها که باعث می‌شود دستگاه سریع‌تر محیط را برداشت کند، حائز اهمیت است [9].<br>Cultural heritage sites can have a large number of visitors and local workers among other constraints that may limit the time to perform acquisition setting faster devices as more suitable [9].  | زمان برداشت<br>Acquisition Time            |
| آثار هنری دارای مواد، ابعاد و برجستگی‌های متفاوتی هستند. سنسور دستگاه باید بتواند جوابگوی چنین مسائلی باشد. به‌طور مثال حساسیت سیستم‌های مستندنگاری در برداشت اجسامی که نیمه شفاف هستند متفاوت است [9].<br>Artworks have arbitrary dimensions, materials and topologies. The sensor should be able to deal with such issues [9].   | انعطاف‌پذیری<br>Flexibility                |
| مربوط به تکرارپذیری یکسان مقادیرهای اندازه‌گیری شده است از یک سوژه در زمان‌های متفاوت است [10].<br>It is about the same reproducibility of the measured values of a subject at different times [10].   | تکرارپذیری نتایج برداشت<br>Repeatability   |
| با توجه به نور موجود، باد، دما، تغییرات فشار و دیگر متغیرها در محیط، حذف عامل مخل داده‌ها در محاسبات مربوط و تشخیص عناصری که می‌خواهیم آن‌ها را مستندنگاری کنیم [10].<br>Relating to robustness under brightness, wind, temperature, and pressure changes, among other variables [10].   | حساسیت محیطی<br>Environmental sensitivity  |

خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.

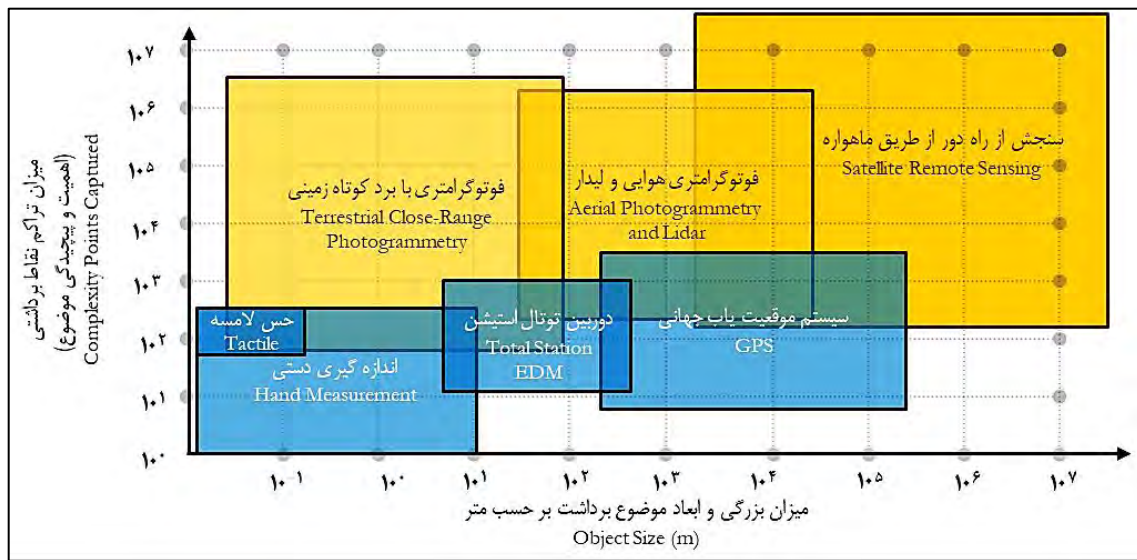
خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.

خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.

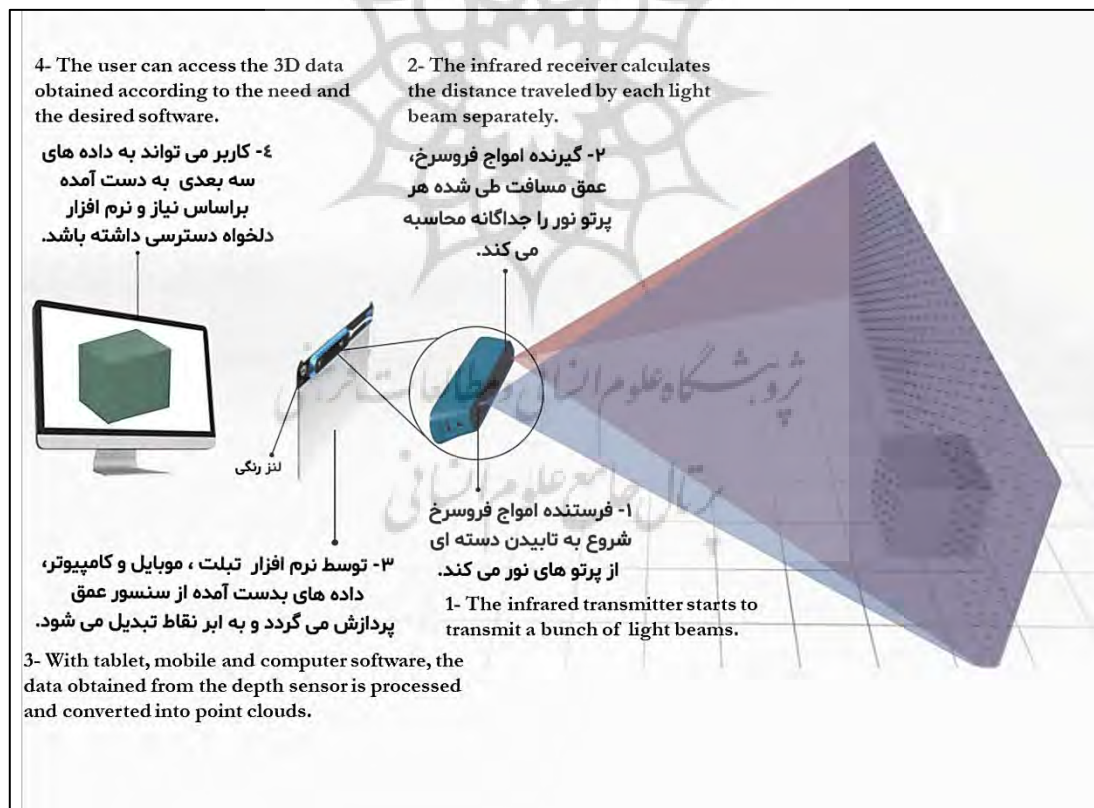
خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.

خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.

خروجی‌های آن کاملاً یا تا حدی نزدیک به استانداردهای صنعتی باشد. سنسور ساختاری که توسط اکسیپیتال توسعه یافته است یک پایگاه (پلتفرم) منبع باز است که زمانی که به یک تبلت، گوشی موبایل و یا کامپیوتر وصل می‌شود، مانند سیستم نور ساختاری متحرک ( SLS: ) می‌شود.



شکل ۱: سیستم‌های برداشت بر اساس ابر نقاط و ابعاد موضوع [13]  
 Fig. 1: Point Clouds Systems and Subject Dimensions [13]



شکل ۲: سازوکار سنسور ساختاری  
 Fig. 2: Mechanism of Structural Sensor

یکپارچه‌سازی فریم‌های سه‌بعدی متفاوت از یک فضا می‌پردازند. آن‌ها از یک استراتژی ترازوی فریم به فریم استفاده می‌کنند که فریم فعلی را به قاب قبلی تراز می‌کند [42]. همچنین برای اولین بار در پژوهشی الگوریتم بازسازی سه‌بعدی در لحظه (Realtime 3D Reconstruction) توسط نیوکامب و همکاران [43] و ایزدی و همکاران [44] به نام فیوژن (Fusion) معرفی شده است. فیوژن به کاربر امکان نگاه‌داشتن و حرکت دادن یک اسکنر استاندارد فرسوخ را می‌دهد، تا به سرعت بازسازی‌های سه‌بعدی مفصلی از یک صحنه داخلی را ایجاد کند.

**جنبه‌های مجهول پژوهش:** بر اساس مشخصات معرفی شده در سایت استراکچر سنسور، برد بهینه اسکنر فرسوخ از ۰/۴ تا ۳/۵ m معرفی شده است. همچنین خطای معرفی شده ۰/۵ mm به ازای m ۰/۴ و ۳۰ mm به ازای ۳ m است. به عبارتی اسکنر دقتی بالای ۹۹٪ در ابعاد اجسام بین ۰/۴ m تا ۳/۵ m دارد، لذا برای مستندنگاری بناهای تاریخی مناسب است. به همین منظور هدف اصلی این پژوهش اعتبارسنجی این ادعا بر اساس نمونه‌موردی‌های برداشت شده به صورت تجربی است تا مناسب بودن این ابزار برای مستندنگاری میراث فرهنگی تأیید شود. اهداف فرعی پژوهش قابلیت اسکنر فرسوخ استراکچر سنسور با توجه به تراکم ابر نقاط و توانایی ابعاد برداشت است. سؤال اصلی پژوهش این است که با توجه به قیمت مناسبی که این ابزار نسبت به سایر سیستم‌های مستندنگاری دارد (حدود ۵۰۰ دلار)، آیا دقت بالای ۹۹٪ را همان‌طور که سازندگان این ابزار معرفی کرده‌اند، تأمین می‌کند یا این دقت یک شعار تبلیغاتی است؟ به منظور بررسی کیفیت و دقت مدل‌های سه‌بعدی بازسازی شده توسط این سنسور از مقررات استاندارد ۲۰۱۷ نقشه‌برداری (بر اساس مقررات کاداستر)<sup>۱</sup> پرداخته شده است.

### ۳. مواد و روش‌ها

روش تحقیق این مقاله برداشت به صورت تجربی و آزمایشی (Experimental) است. برای رسیدن به این

جریان خروجی از سنسور ساختاری دارای یک مجموعه داده نقطه‌ای با رزولوشن ۴۸۰ × ۶۴۰ پیکسل است، که در آن هر پیکسل فاصله سنسور تا هدف را ثبت می‌کند. سنسور فرسوخ، شدت بازتاب نور فرسوخ (IR: Infrared) که توسط پروژکتور IR بر هدف منتشر می‌شود، را ثبت می‌کند، درحالی‌که SOC، صحنه سه‌بعدی را سه‌گوش می‌کند و طبق بیانات مخترعان آن [18]، پروژکتور دارای لنز میکرو، فاصله کانونی مختلفی دارد که تابش فرسوخ را بر تشکیل یک الگوی غیریکنواخت از نقاط متمرکز می‌کند که فاصله آن‌ها با سنسور متفاوت است. الگوی مرجع در حافظه سنسور ذخیره می‌شود تا به ایجاد ارتباط بین نقاط الگو و محاسبه داده‌های دامنه به عنوان اختلاف در تصویر کانونی کمک کند. از طریق پردازش تصویر و الگوریتم‌های سه‌گوش‌سازی، الگوی طرح‌ریزی شده به اطلاعات سه‌بعدی تبدیل می‌شود [19].

**جنبه‌های معلوم پژوهش:** در سیستم مستندنگاری فرسوخ، تحقیقات زیادی در مورد بازسازی سه‌بعدی انسان بر اساس داده‌های رنگ و عمق با توجه به هزینه کمتر و به‌منظور بهره‌وری بیشتر [20-25] انجام شده است. همچنین تحقیقات زیادی بر روی ارتقای کیفیت ورودی داده‌های رنگ و عمق برای رسیدن به مدل سه‌بعدی با جزئیات بیشتر بر اساس کاهش اعوجاج‌های ابر نقاط انجام شده است [23-24]، [26-28]. تحقیقاتی که بر روی تنظیم و کالیبراسیون سنسور رنگی و سنسور عمق و ایجاد هماهنگی نسبی بین سنسورها انجام شده است [29-34]. مدل سه‌بعدی برداشت شده توسط اسکنر فرسوخ در اغلب موارد دارای محل‌هایی است که توسط اسکنر شناسایی و برداشت نشده است. به این محل‌های خالی اصطلاحاً حفره (Hole) می‌گویند. تحقیقاتی که بر روی ترمیم و کاهش حفره‌های مدل برداشت شده توسط اسکنر انجام شده است [35-41]. در پژوهش صورت گرفته توسط کلانتری و همکاران دیوارهای یک خانه که ابعاد همگی بیشتر از دو متر هستند اسکن شده و خطاهای اسکنر بررسی شده است [19]. هنری و همکاران در پژوهشی به





شکل ۳: مراحل مستندنگاری با سنسور ساختاری  
Fig. 3: Structural Sensor Documentation Steps

فرهنگی شده، تاکنون اقدامات مهمی برای حفظ، نگهداری و مرمت این بنا صورت نگرفته است (شکل ۴). در این عمارت می‌توان موازین تلفیق سبک‌های معماری را در سه الگوی کلی مشاهده نمود. الف) الگوی طراحی کاخ‌های ایران باستان در این خانه مشهود است. این الگو همان استفاده از حجاری، نقاشی، برون‌گرایی و توجه به عظمت با استفاده از ارتفاع‌گرایی در ایوان و تالار اصلی است. ب) الگوی طراحی معماری خانه‌های سنتی در این خانه مشهود است. این الگو همان استفاده از کاشی‌کاری هفت‌رنگ، کاشی معقلی، پنجره ارسی، آرایه‌های چوبی، نقاشی مینیاتور، آجر لعاب‌دار، مقرنس، بادگیر و درون‌گرایی است. ج) الگوی طراحی معماری غربی که به‌وضوح در این خانه مشهود است. این الگو همان استفاده از ستون کرتتین، نقاشی پرسپکتیو‌دار،

هدف، طی سه مرحله اقدام گردیده است (شکل ۳).  
**مرحله اول: برداشت میدانی:** در این مرحله برای ابعاد بالاتر از دو متر یک بنای تاریخی انتخاب و تمامی فضاهای آن توسط اسکنر فرورسرخ برداشت شده و ۵ اتاق آن برای گزارش در پژوهش انتخاب شده است. برای ابعاد زیر دو متر، ماکتی از مسجد امام اصفهان انتخاب و مستندنگاری شده است. بنای تاریخی انتخاب شده عمارت اعتمادالسلطنه واقع در خیابان پانزده خرداد، بازار بزرگ تهران، امتداد جنوبی چارسوق بزرگ، ضلع شرقی بازار مسگرها، کوچه هفت تن واقع شده است و به‌صورت دو بخش اندرونی و بیرونی در سه طبقه زیرزمین، همکف و اول با مساحت ۲۰۰ m<sup>2</sup> و زیربنا ۷۱۸m<sup>2</sup> ساخته شده است. به رقم آنکه در نزدیکی مرکز بازار بزرگ تهران واقع و با قدمت قاجاریه ثبت میراث



شکل ۴: عمارت اعتمادالسلطنه  
Fig. 4: The E'temad Al-Saltaneh



جدول ۲: ابعاد به‌دست‌آمده واقعی و ابعاد به‌دست‌آمده از اسکنر  
Table 2: Actual Dimensions and Scanner Dimensions

| ابعاد به‌دست‌آمده از اسکنر (متر)<br>Scanner Dimensions (m) | ابعاد واقعی (متر)<br>Actual Dimensions (m) | ابعاد<br>Dimensions | اتاق<br>Room     |
|--|--|---------------------|------------------|
| 3.332  | 4.381                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۱<br>Room 1 |
| 1.827  | 2.253                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 1.762  | 2.935                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 3.505  | 4.387                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 2.341  | 2.549                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۲<br>Room 2 |
| 4.105  | 4.403                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 2.304  | 2.548                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 4.006  | 4.352                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 4.207  | 4.803                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۳<br>Room 3 |
| 4.503  | 4.754                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 7.109  | 8.405                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 7.006  | 8.156                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 4.102  | 4.407                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۴<br>Room 3 |
| 4.206  | 4.504                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 1.906  | 1.902                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 1.508  | 1.875                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 5.305  | 4.632                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۵<br>Room 5 |
| 5.258  | 4.529                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 2.994  | 3.326                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 2.894  | 3.253                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |

### ۳-۱. برداشت میدانی

در این مرحله با استقرار سنسور ساختاری (اسکنر فرسرخ) بر روی iPad 10.5 inch و نصب برنامه ساختاری، لنز رنگی را در ابتدا با سنسور عمق هماهنگ کرده و سپس رایانه همراه و iPad 10.5 inch را روی یک شبکه وای فای داخلی متصل می‌کنیم. برنامه همراه نصب کرده و در این حالت سه دستگاه iPad 10.5 inch سنسور ساختاری و رایانه همراه با هم همگام‌سازی می‌شوند. سپس در فضای موردنظر قرار گرفته و روی اشیاء موردنظر سنسور ساختاری را نشانه‌گیری کرده و دکمه ثبت را می‌زنیم. آهسته اسکنر را در یک نقطه ثابت به سمت تمامی اشیاء موجود در فضا می‌چرخانیم. نور ساطع‌شده از اسکنر به سطوح برخورد کرده و سپس به اسکنر برمی‌گردد. اسکنر مسافت طی شده را محاسبه می‌کند. داده‌ها به صورت ابرنقطاتی که هر یک دارای مختصات هندسی هستند از طریق شبکه وای فای روی رایانه ذخیره می‌شوند. ابر نقاط ثبت شده (شکل ۵)، تنها نشان‌دهنده مختصات هندسی اشیاء موجود در فضا می‌باشند و رنگ اشیاء را ثبت نمی‌کنند. در نرم‌افزار Skanect 3D Scanning Software باید جداگانه رنگ برداشت‌شده به این ابر

گچ‌بری کلوخی، نقاشی رئال، نقاشی ویترا است [45].

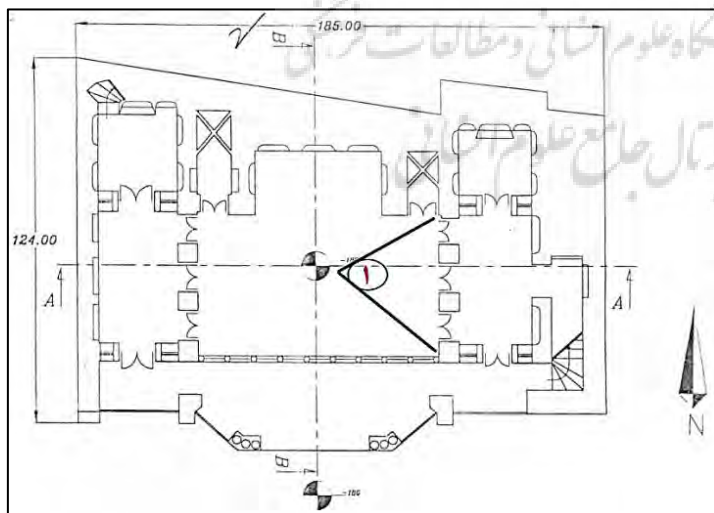
### مرحله دوم: ویرایش و یکپارچه‌سازی:

پردازش داده‌های ابر نقاط در دفتر فنی به‌منظور یکپارچه‌سازی برداشت‌ها، حذف ابرنقاط اضافی و بهبود کیفیت ابرنقاط برداشت شده است؛

### مرحله سوم: ارزیابی دقت برداشت‌ها:

ارزیابی دقت برداشت‌ها از طریق مقایسه ابعاد واقعی بنا با ابعاد به‌دست‌آمده از سنسور ساختاری صورت گرفته است. در مقررات نقشه‌برداری ۲۰۱۷ بیان می‌کند که نقشه‌برداران دارای مجوز باید اطمینان حاصل کنند که همه طول‌ها با دقت  $10\text{mm} + 50\text{ppm}$  و یا با دقت  $95\%$  اندازه‌گیری و تعیین شوند<sup>۲</sup>. ابعاد فضاهای داخلی برداشت‌شده در آزمایش در (جدول ۲) توصیف شده‌اند.

برای تبیین رابطه بین ابعاد جسم و خطای اندازه‌گیری اسکنر سنسور ساختاری از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شده است. در مباحث آماری، ضریب همبستگی پیرسون میزان همبستگی خطی بین دو متغیر تصادفی را می‌سنجد. مقدار این ضریب بین  $-1$  تا  $1$  تغییر می‌کند که « $1$ » به معنای همبستگی مثبت کامل، « $0$ » به معنی نبود همبستگی و « $-1$ » به معنی همبستگی منفی کامل است [46]. ابزار اندازه‌گیری پژوهش، نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ است.



شکل ۵: برداشت ۱ که بر روی پلان همکف، محل استقرار اسکنر مشخص شده است.  
Fig. 5: Scanning 1, indicated on the ground plan, where the scanner is located.

روی عوارض برداشت‌شده مانند سطوح و اجسام) قابل انجام است. به عبارتی اولین سیستم مختصات ابرنقاط به‌عنوان سیستم مختصات مبنا انتخاب‌شده و دومین ابرنقاط بر اساس نقاط مشترک به سیستم مختصات ابرنقاط مبنا اضافه می‌شود. این فرایند با توجه به قابلیت نرم‌افزار مورد استفاده، می‌تواند برای دو یا چند ابرنقطه مختلف به‌طور هم‌زمان انجام شود (شکل ۷). همچنین در صورتی که موقعیت استقرارها در یک سیستم مختصات مشخص باشد، می‌توان بدون نقاط مشترک برداشت‌شده نیز یکپارچه‌سازی را انجام داد. ما در این خانه برای یکپارچه‌سازی ابرنقاط از برنامه 3DS MAX استفاده کرده‌ایم. پس از یکپارچه‌سازی اطلاعات بایستی ویرایش ابرنقاط صورت گیرد. ویرایش دارای دو بخش عمده است. ۱- حذف ابرنقاط اضافه: دستگاه اسکنر فرورسرخ در برداشت عوارض، با توجه به برداشت خودکار نقاط، تقریباً در تمامی برداشت‌ها اطلاعات اضافه نیز برداشت می‌شوند که علاوه بر افزایش حجم داده‌ها، در مواردی ممکن است باعث ایجاد خطا در داده‌ها و درنهایت خروجی‌ها شوند که باید به‌صورت دستی حذف شوند. ۲- ویرایش ابرنقاط به‌منظور بهبود کیفیت: به این منظور در نرم‌افزار MeshLab می‌توان اعوجاج‌های ابرنقاط را برطرف کرد. همچنین نقطه‌ای از سطوح را که دستگاه نتوانسته است برداشت کند، نرم‌افزار توسط میان‌یابی هندسی به‌صورت خودکار اضافه کرده و میانگین رنگ ابرنقاط آن ناحیه را به ابرنقاط تازه ایجادشده نسبت می‌دهد.

### ۳-۳. ارزیابی دقت برداشت‌ها

پس از برداشت نقاط با تراکم موردنیاز و یکپارچه‌سازی ابرهای نقاط، مدل سه‌بعدی به همراه ابعاد متریک بنا کاملاً در دسترس است و می‌توان اندازه‌گیری‌های موردنیاز را بر روی آن‌ها انجام داد [3]. خروجی این مدل‌سازی‌ها متناسب با نرم‌افزاری که استفاده می‌شود می‌توانند شامل پلان‌ها، نماها، مقطع، انیمیشن، واقعیت مجازی، واقعیت افزوده، تهیه نقشه‌های بافت، جنس سطوح، جزئیات معماری و تشخیص وضعیت ساخت بنای تاریخی مزبور باشند (شکل ۸).



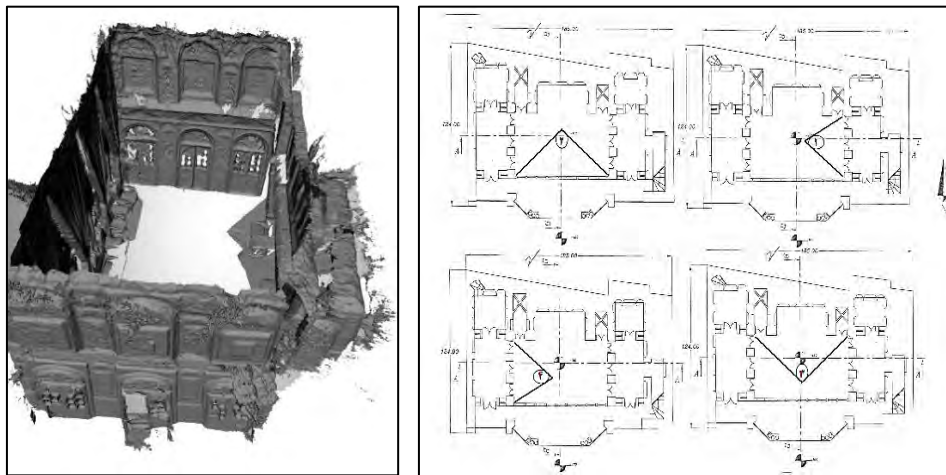
شکل ۶: رنگ ابرنقاط توسط لنز رنگی RGB و توسط نرم‌افزار به نقاط مربوطه به برداشت ۱ نسبت داده شده است.

Fig. 6: Point Clouds color has been attached to the Scanning 1 by RGB lens and software.

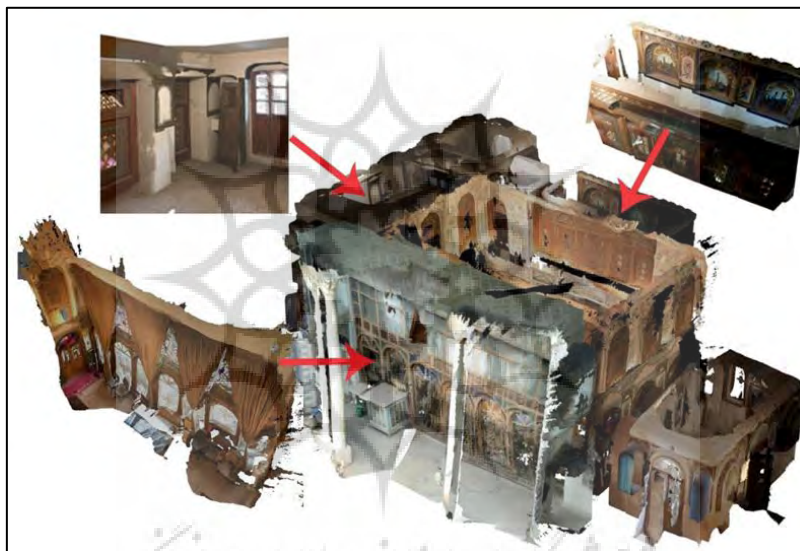
نقاط اختصاص یابد (شکل ۶). شبکه برداشت ابرنقاط، به‌گونه‌ای طراحی شد که هر قسمت از بنا، حداقل از یک اسکن استفاده شده است. همچنین لازم است به‌منظور یکپارچه‌سازی برداشت‌ها، در هر استقرار و اسکن، از استقرارهای دیگر عوارضی مشترک برداشت شود. برای برداشت خانه اعتمادالسلطنه، تالار اصلی خانه چهارنوبت (شکل ۷) و سایر فضاها یک نوبت اسکن شده‌اند و درنهایت برای برداشت کل خانه یازده نوبت اسکن صورت گرفته است (شکل ۸). تعداد ابرنقاط در هر برداشت بین  $10^3$  الی  $10^6$  نقطه است که توسط نرم‌افزار 3DS MAX محاسبه شده است.<sup>۳</sup>

### ۳-۲. ویرایش و یکپارچه‌سازی

پس از تکمیل عملیات برداشت، مجموعه‌ای از ابرهای نقاط به‌صورت منفرد به دست می‌آید که لازم است برای داشتن ابرنقاط یکپارچه از کل بنا، این ابرهای نقاط با یکدیگر تلفیق و یکپارچه شوند. برای یکپارچگی، یکی از اسکن‌ها و ابرهای نقاط مربوطه به‌عنوان پایه در نظر گرفته‌شده و دیگر اسکن‌ها و ابرهای نقاط به آن اضافه و متصل می‌شود. اتصال دو ابرنقطه به یکدیگر بدون نیاز به اطلاعات تکمیلی (مانند مختصات دو استقرار) قابل انجام است و صرفاً با داشتن حداقل سه نقطه مشترک (بر



شکل ۷: یک دیوار به‌عنوان مبنا انتخاب‌شده و سایر دیوارها به دیوار مبنا اضافه‌شده، تالار اصلی ۴ نوبت اسکن شده است.  
 Fig. 7: One wall selected as the base and the other walls added to the base wall, the main hall being scanned 4 times.



شکل ۸: برای رسیدن به مدل سه‌بعدی کل خانه، ۱۱ نوبت اسکن انجام شده است.  
 Fig. 8: 11 scans were performed to achieve the 3D model of the entire house.

$$A_e = true_d - model_d$$

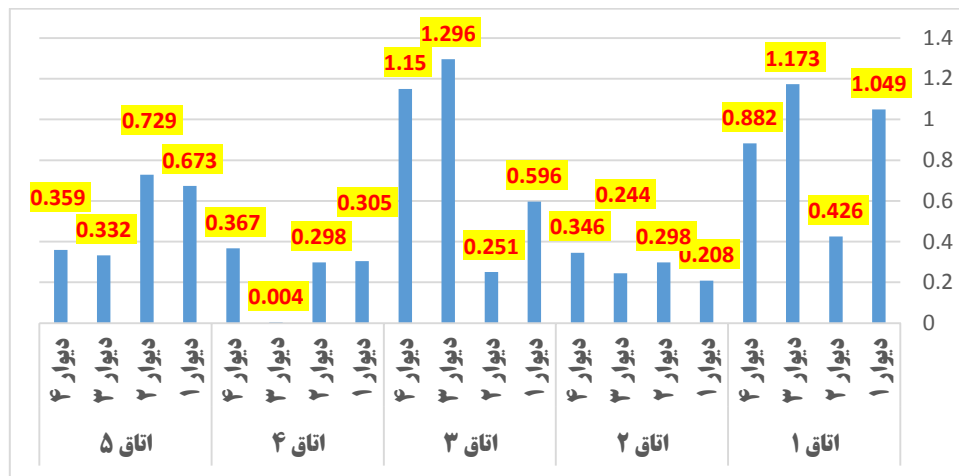
$$R_e = \frac{A_e}{true_d}$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n (R_e i)}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_e i)^2}{n}}$$

در شکل ۹، محور افقی، دیوارهای اتاق‌ها را نشان می‌دهد، درحالی‌که محور عمودی مقدار خطای مطلق آن دیوار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده‌شده است ۲۰ سنجش به دو دسته تقسیم شده‌اند: الف) سنجش‌های به‌دست‌آمده از ابعاد واقعی ساختمان و ب) ابعاد به‌دست‌آمده از اسکنر. برای هر اتاق برداشت‌شده، خطاهای مطلق: (Absolute error)  $A_e$  و نسبی ( $R_e$ : Relative error) سنجش‌ها، محاسبه شدند تا اعتبار سنسور را بر اساس میانگین خطای نسبی (MRE: Mean Relative Error) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE: Root-Mean-Square Error) ارزیابی شود.



شکل ۹: توزیع خطاهای مطلق برای هر اتاق اسکن شده در واحد متر (A<sub>c</sub>)

Fig. 9: Distribution of absolute errors for each room scanned in meters

جدول ۳: وضعیت رابطه همبستگی بین ابعاد واقعی دیوارها با خطای مطلق حاصل از اسکنر فروسرخ

Table 3: Status of correlation between actual dimensions of walls with absolute error of infrared scanner

| خطای مطلق<br>Absolute Error | آزمون پیرسون<br>Pearson Test            | ابعاد واقعی دیوارها<br>Actual Dimensions of Walls |
|-----------------------------|---|---|
| 0.650                       | ضریب همبستگی<br>Correlation Coefficient |   |
| *0.02                       | سطح معناداری<br>Significance Level      |   |

\* معناداری در سطح بالاتر از ۹۵ درصد

به دست آمده از اسکن سه بعدی،  $0.08573m$  است. این مقدار نشان می‌دهد که خطاهای نسبی تمایل دارند در این دامنه تغییر کنند. درصد میانگین خطای نسبی،  $17/173\%$  در سنجش حقیقی محاسبه شده است. به عبارتی دقت اسکنر برای مستندنگاری این بنا  $86/827\%$  بوده است. باین حال خطای جذر میانگین مربعات، که سنجشی برای برآزش خطای مطلق داده‌ها است، حداکثر میانگین فاصله  $0/6589m$  را برآزیده، یافته است. لذا در (جدول ۳) خطای مطلق دیوارهایی که پایین‌تر از این مقدار بوده به رنگ سبز و خطای مطلق دیوارهایی که بالاتر از این مقدار بوده به رنگ زرد درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تا ابعاد  $5m^2$  خطای اسکنر برای کارهای غیرتخصصی مانند استفاده از اسکنر در بازی‌های مبتنی بر واقعیت افزوده قابل قبول است. اعتبار خطای برداشت از مستندات به شرح زیر خواهد بود (جدول ۵).

بر اساس آزمون همبستگی پیرسون که در (جدول ۳) ارائه شده است، ابعاد دیوارها با خطای مطلق اسکنر به میزان  $0/65$  همبستگی دارد که نشان از همبستگی بالا است. با توجه به معناداری آزمون در سطح بالاتر از ۹۵ درصد، می‌توان نتیجه گرفت هرچه ابعاد دیوارها بزرگ‌تر می‌شود، خطای اسکنر هم بیشتر می‌شود. بر اساس (جدول ۴)، دقت اسکنر فروسرخ برای دیوارها با کمترین خطای مطلق برای دیوار ۳ در اتاق ۴ که برابر است با  $0/04m$  و با بیشترین خطای مطلق برای دیوار ۳ در اتاق ۳، که برابر با  $1/296m$  است. همچنین دقت اسکنر فروسرخ برای اتاق‌ها با کمترین میانگین خطای مطلق برای اتاق ۴ که برابر است با  $0/2435m$  و با بیشترین میانگین خطای مطلق برای اتاق ۱، که برابر با  $0/8825m$  است. مطابق (جدول ۵)، انحراف معیار خطاهای نسبی ابعاد



جدول ۴: نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه تطبیقی ابعاد واقعی خانه و ابعاد به‌دست‌آمده از اسکنر

Table 4: Results from a Comparative Comparison of the Actual Dimensions of the House and the Scanner Dimensions

| خطای نسبی<br>Relative Error | میانگین خطای مطلق<br>در هر اتاق<br>Average Absolute Error per Room | خطای مطلق<br>Absolute Error | ابعاد به‌دست‌آمده از<br>اسکنر (متر)<br>Scanner Dimensions (m) | ابعاد واقعی (متر)<br>Actual Dimensions (m) | ابعاد<br>Dimensions | اتاق<br>Room     |
|-----------------------------|--|-----------------------------|---|--|---------------------|------------------|
| 0.23944305                  | 0.8825   | 1.049                       | 3.332   | 4.381                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۱<br>Room 1 |
| 0.189081225                 |  | 0.426                       | 1.827   | 2.253                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 0.399659284                 |  | 1.173                       | 1.762   | 2.935                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 0.201048553                 |  | 0.882                       | 3.505   | 4.387                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 0.081600628                 | 0.274  | 0.208                       | 2.341   | 2.549                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۲<br>Room 2 |
| 0.067681127                 |  | 0.298                       | 4.105   | 4.403                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 0.095761381                 |  | 0.244                       | 2.304   | 2.548                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 0.079503676                 |  | 0.346                       | 4.006   | 4.352                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 0.124089111                 | 0.82325  | 0.596                       | 4.207   | 4.803                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۳<br>Room 3 |
| 0.052797644                 |  | 0.251                       | 4.503   | 4.754                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 0.154193932                 |  | 1.296                       | 7.109   | 8.405                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 0.14100049                  |  | 1.15                        | 7.006   | 8.156                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 0.069208078                 | 0.2435   | 0.305                       | 4.102   | 4.407                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۴<br>Room 3 |
| 0.06616341                  |  | 0.298                       | 4.206   | 4.504                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 0.002098636                 |  | 0.004                       | 1.902   | 1.906                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 0.195733333                 |  | 0.367                       | 1.508   | 1.875                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |
| 0.126861451                 | 0.52325  | 0.673                       | 4.632   | 5.305                                      | دیوار ۱<br>Wall 1   | اتاق ۵<br>Room 5 |
| 0.138645873                 |  | 0.729                       | 4.529   | 5.258                                      | دیوار ۲<br>Wall 2   |                  |
| 0.099819603                 |  | 0.332                       | 2.994   | 3.326                                      | دیوار ۳<br>Wall 3   |                  |
| 0.110359668                 |  | 0.359                       | 2.894   | 3.253                                      | دیوار ۴<br>Wall 4   |                  |

جدول ۵: داده‌های توصیفی اسکنر

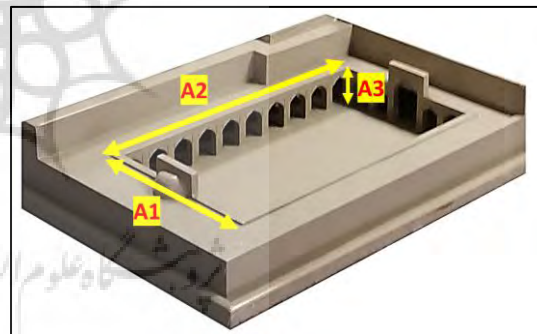
Table 5: Descriptive Data of Scanner

|          |  |
|----------|--|
| 0.08573  | انحراف معیار خطاهای نسبی<br>Standard deviation relative errors |
| 0.007    | واریانس خطاهای نسبی<br>Variance of relative errors             |
| 0.131738 | میانگین خطای نسبی<br>Mean Relative Error                       |
| 0.659825 | خطای جذر میانگین مربعات<br>Root-Mean-Square Error              |

از داده‌های باکیفیت برای مدیریت و امنیت حق مالکیت موردنیاز است. بر اساس میانگین خطای نسبی نتایج سنسور فرورسرخ مطابق مقررات نقشه‌کشی کاداستر ۲۰۱۷ نیستند و انحرافات آن در ابعاد بالای ۲ m بیش از ۵ درصد و یا به عبارتی ۰/۰۵ m است. لذا برای مستندنگاری بناهای تاریخی مناسب نیست. همچنین برای بررسی دقت اسکنر در ابعاد بین ۰/۴ m تا ۲ m، سوژه‌ای با ابعاد نزدیک به ابعاد موردنیاز برای آزمایش انتخاب شده (شکل ۱۰)، توسط سنسور ساختاری برداشت و ابر نقاط به دست آمده (شکل ۱۱) پردازش شده، سپس دقت برداشت‌ها ارزیابی شده است.

بر اساس (جدول ۶) میانگین خطای نسبی برابر با ۰/۰۳۳۰۳ است، به عبارتی دقت اسکنر برای مستندنگاری این ماکت ۹۶/۶۹۷٪ بوده است. از آنجایی که دقت برداشت بالای ۹۵٪ اندازه‌گیری شده خطای آن قابل قبول است.

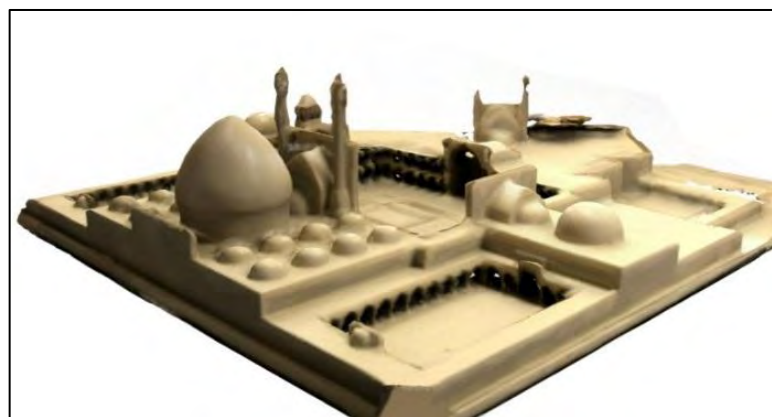
دقت خروجی‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل معیارهای خطا در بخش قبلی، مدل‌های سه‌بعدی برداشت‌شده توسط سنسور فرورسرخ، برای اتاق‌های کوچک‌تر، خطای کمتری نسبت به ابعاد حقیقی داشته است و هرچه ابعاد بالاتر رفته این خطاها بیشتر شده است. طبق مقررات نقشه‌کشی ۲۰۱۷ افراد نقشه‌کش دارای مجوز باید اطمینان حاصل کنند همه طول‌ها با دقت  $+ 50 \text{ ppm}$  و یا با دقت بالای ۹۵٪ اندازه‌گیری و تعیین شده‌اند. این میزان از دقت برای اطمینان حاصل کردن



شکل ۱۰: ماکت مسجد امام اصفهان

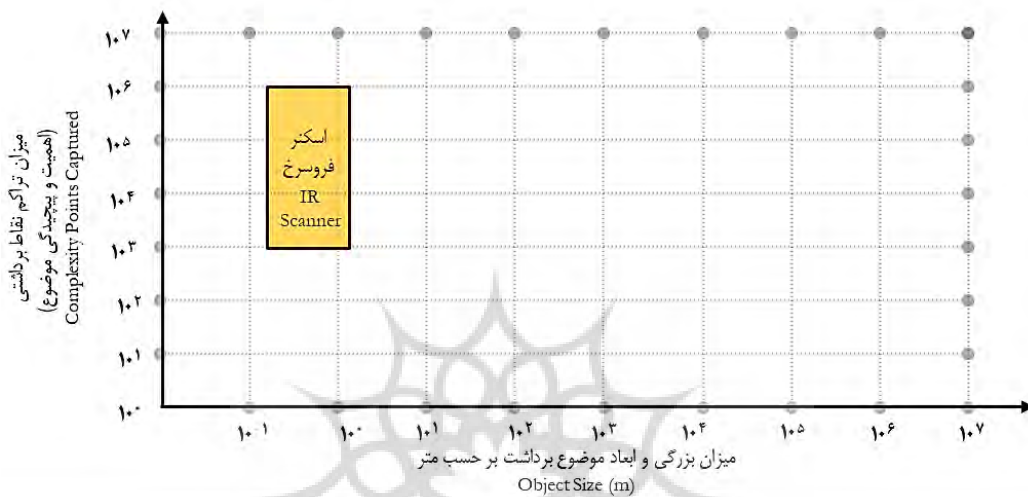
Fig. 10: Replica of Imam Isfahan Mosque

شکل ۱۱: اسکن سه‌بعدی ماکت مسجد امام اصفهان توسط سنسور ساختاری  
Fig. 11: 3D scanning of the Imam Mosque of Esfahan by structural sensor



جدول ۶: نتایج به دست آمده از مقایسه تطبیقی ابعاد واقعی ماکت و ابعاد به دست آمده از اسکنر  
Table 6: Results from a Comparative Comparison of the Actual Dimensions of the replica and the Scanner Dimensions

| خطای نسبی<br>Relative Error | خطای مطلق<br>Absolute Error | ابعاد به دست آمده از اسکنر (متر)<br>Scanner Dimensions (m) | ابعاد واقعی (متر)<br>Actual Dimensions (m) | ابعاد<br>Dimensions |
|-----------------------------|-----------------------------|--|--|---------------------|
| 0.00901                     | 0.003                       | 0.33   | 0.333                                      | A1                  |
| 0.00161                     | 0.001                       | 0.62   | 0.621                                      | A2                  |
| 0.125                       | 0.01                        | 0.07   | 0.08                                       | A3                  |
| 0.0098                      | 0.02                        | 2.02   | 2.04                                       | B1                  |
| 0.02247                     | 0.06                        | 2.61   | 2.67                                       | B2                  |
| 0.0303                      | 0.005                       | 0.16   | 0.165                                      | B3                  |



شکل ۱۲: قابلیت اسکنر فرسرخ بر اساس تراکم ابر نقاط و ابعاد موضوع

Fig. 12: Capability of Infrared Scanner Based on Point Clouds Density and Subject Dimensions

#### ۴. نتیجه گیری

بر اساس آزمون همبستگی نتیجه نشان می دهد که هرچه ابعاد موضوع مستندنگاری بالا می رود، خطای اندازه گیری بالا می رود. این نتایج نیازهای عملکردهایی مانند جهت یابی داخل ساختمان و موقعیت یابی داخلی را برطرف می سازد، اما نیازهای نقشه کشی ۲۰۱۷ به منظور مستندنگاری هندسی بناهای تاریخی را برطرف نمی سازد. بر اساس نتایجی که در مستندنگاری این پروژه با سیستم اسکنر فرسرخ حاصل شد، می توان بیان کرد با توجه به دقت این سیستم مستندنگاری برای برداشت و سه بعدی سازی ساختمان های تاریخی مناسب نیست اما برای اجسام تاریخی که کمتر از ۲ m هستند گزینه مناسبی محسوب می شود زیرا نیاز به یکپارچه سازی داده ها نیست، در یک برداشت تمامی ابر نقاط مورد نیاز به دست می آید و اسکنر، دقتی بالای ۹۵٪ دارد که قابل قبول است. همچنین تعداد ابر نقاط در هر

بنابراین بر اساس اطلاعات به دست آمده می توان به سؤال پژوهش پاسخ داد، دقت بالای ۹۹٪ که سازندگان ادعا کرده اند، سنسور ساختاری در ابعاد اجسام بین ۰/۴m تا ۳/۵ m داراست درست نیست و شعاری تبلیغاتی است. همچنین برای بررسی اجمالی دقت اسکنر بر اساس یافته ها می توان نتیجه گرفت این سنسور برای اسکن سه بعدی اشیاء طراحی شده است و تا ۲m<sup>3</sup> دقت اسکنر فرسرخ بالای ۹۵٪ است که بر اساس مقررات نقشه کشی ۲۰۱۷ قابل قبول است. لازم به ذکر است بر اساس آزمایش انجام شده، اسکنر فرسرخ اجسام منفرد با ابعاد کمتر از ۳۰cm<sup>3</sup> را به سختی تشخیص می دهد. بنابراین افراد متخصص و غیرمتخصص با انتخاب دامنه کوچک تری از اشیای ارزشمند تاریخی اسکن شده (۳۰cm تا ۲۰۰cm)، می توانند به مدل های سه بعدی با دقت قابل قبول دست یابند. لذا به عنوان نتیجه تحقیق می توان نمودار (شکل ۱۲) را ترسیم نمود.

این مقاله، بررسی ابزارهای پژوهش در بخش تدوین روش تحقیق برای تدوین رساله دکتری نگارنده دوم به راهنمایی نگارنده اول در دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی است که هم‌اکنون در حال انجام است.

برداشت بین  $10^3$  الی  $10^6$  نقطه است و ابعاد برداشت با در نظر گرفتن خطای جذر میانگین مربعات تا  $5 \text{ m}^3$  قابل انجام است و بیشتر از آن اسکنر قابلیت ندارد. از طرفی اسکنر توانایی شناسایی اجسام کمتر از  $30 \text{ cm}^3$  را به‌سختی دارد.

### پی‌نوشت‌ها

1. Surveying and Spatial Information Regulation. 2017. under the Surveying and Spatial Information Act 2002
2. In making a survey, a surveyor must measure all lengths to an accuracy of  $10\text{mm} + 50$  parts per million or better at a confidence level of 95%.
3. Calculated by Editable Poly Surface

### سپاسگزاری

در کمال احترام، از جناب آقایان مهندس علیرضا استوار، نیما کمالی تبریزی و مهندس حامد زارعان که در جهت اعتلا و ارتقا مقاله یاری نمودند، نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

### References

- [1] Georgopoulos A. CIPA's perspectives on cultural heritage. In Digital Research and Education in Architectural Heritage 2017 Mar 30 (pp. 215-245). Springer, Cham. [doi.org/10.1007/978-3-319-76992-9\_13]
- [2] Campion K. Blast through the past: Terrorist attacks on art and antiquities as a reconquest of the modern Jihadi identity. Perspectives on terrorism. 2017 Feb 1;11(1):26-39.
- [3] Sgrenzaroli M. Cultural heritage 3D reconstruction using high resolution laser scanner: new frontiers data processing. In CIPA 2005 XX International Symposium 2005 Sep 26 (Vol. 3).
- [4] Cooper N. Guide to recording historic buildings. 1990.
- [5] Letellier R, Eppich R. Recording, documentation and information management for the conservation of heritage places. Routledge; 2015 Dec 22. [doi.org/10.4324/9781315793917]
- [6] Shao J, Zhang W, Mellado N, Grussenmeyer P, Li R, Chen Y, Wan P, Zhang X, Cai S. Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation. Journal of Cultural Heritage. 2019 Jan 1;35:16-24. [doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.013]
- [7] Serna CG, Pillay R, Trémeau A. Data fusion of objects using techniques such as Laser Scanning, Structured Light and Photogrammetry for Cultural Heritage Applications. In International Workshop on Computational Color Imaging 2015 Mar 24 (pp. 208-224). S. [doi.org/10.1007/978-3-319-15979-9\_20]
- [8] Mahajan A, Bharti V, Singh HP, Josyula L, Kumar P. Construction of a 3D Map of Indoor Environment. Procedia Computer Science. 2018 Jan 1;125:124-31. [doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.018]
- [9] Remondino F, Rizzi A. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples. Applied Geomatics. 2010 Sep 1;2(3):85-100. [doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x]
- [10] Curless B, Seitz S. 3D Photography. Course Notes for SIGGRAPH 2000. 2000 Jul.
- [11] Zhang W, Wang C, Xi X. 3D Scan of Ornamental Column (huabiao) Using Terrestrial LiDAR and Hand-held Imager. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015;40(5):491. [doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-491-2015]
- [12] Bok Y, Jeong Y, Choi DG, Kweon IS. Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor. International Journal of Computer Vision. 2011 Aug 1;94(1):36-53. [doi.org/10.1007/s11263-010-0397-8]
- [13] Blake B, Bedford J. Documentation for

- conservation, a manual for teaching metric survey skills. 2008.
- [14] Microsoft Kinect. [(Accessed on 10 September 2015)]; Available online: <http://www.xbox.com/en-US/xbox-one/accessories/kinect-for-xbox-one>.
- [15] Anguelov D, Srinivasan P, Koller D, Thrun S, Rodgers J, Davis J. SCAPE: shape completion and animation of people. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers* 2005 Jul 1 (pp. 408-416). [doi.org/10.1145/1073204.1073207]
- [16] Mao A, Zhang H, Liu Y, Zheng Y, Li G, Han G. Easy and fast reconstruction of a 3D avatar with an RGB-D sensor. *Sensors*. 2017 May;17(5):1113. [doi.org/10.3390/s17051113]
- [17] Beňo P, Duchoň F, Tölgyessy M, Hubinský P, Kajan M. 3d map reconstruction with sensor kinect: Searching for solution applicable to small mobile robots. In *2014 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)* 2014 Sep 3 (pp. 1-6). [doi.org/10.1109/RAAD.2014.7002252]
- [18] Freedman B, Shpunt A, Machline M, Arieli Y, inventors; PrimeSense Ltd, assignee. Depth mapping using projected patterns. United States patent US 8,493,496. 2013 Jul 23.
- [19] Kalantari M, Nechifor M. Accuracy and utility of the Structure Sensor for collecting 3D indoor information. *Geospatial information science*. 2016 Jul 2;19(3):202-9. [doi.org/10.1080/10095020.2016.1235817]
- [20] Weiss A, Hirshberg D, Black MJ. Home 3D body scans from noisy image and range data. In *2011 International Conference on Computer Vision* 2011 Nov 6 (pp. 1951-1958). IEEE. [doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126465]
- [21] Tong J, Zhou J, Liu L, Pan Z, Yan H. Scanning 3d full human bodies using kinects. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2012 Mar 9;18(4):643-50. [doi.org/10.1109/TVCG.2012.56]
- [22] Cui Y, Chang W, Nöll T, Stricker D. KinectAvatar: fully automatic body capture using a single kinect. In *Asian Conference on Computer Vision* 2012 Nov 5 (pp. 133-147). Springer, Berlin, Heidelberg. [doi.org/10.1007/978-3-642-37484-5\_12]
- [23] Li H, Vouga E, Gudym A, Luo L, Barron JT, Gusev G. 3D self-portraits. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2013 Nov 1;32(6):1-9. [doi.org/10.1145/2508363.2508407]
- [24] Chen Y, Dang G, Cheng ZQ, Xu K. Fast capture of personalized avatar using two Kinects. *Journal of Manufacturing Systems*. 2014 Jan 1;33(1):233-40. [doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.11.005]
- [25] Zhu H, Yu Y, Zhou Y, Du S. Dynamic human body modeling using a single RGB camera. *Sensors*. 2016 Mar;16(3):402. [doi.org/10.3390/s16030402]
- [26] Khoshelham K, Elberink SO. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors*. 2012 Feb;12(2):1437-54. [doi.org/10.3390/s120201437]
- [27] Canessa A, Chessa M, Gibaldi A, Sabatini SP, Solari F. Calibrated depth and color cameras for accurate 3D interaction in a stereoscopic augmented reality environment. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2014 Jan 1;25(1):227-37. [doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.02.011]
- [28] Herrera D, Kannala J, Heikkilä J. Joint depth and color camera calibration with distortion correction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012 May 29;34(10):2058-64. [doi.org/10.1109/TPAMI.2012.125]
- [29] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2000 Nov;22(11):1330-4. [doi.org/10.1109/34.888718]
- [30] Smisek J, Jancosek M, Pajdla T. 3D with Kinect. In *Consumer depth cameras for computer vision* 2013 (pp. 3-25). Springer, London. [doi.org/10.1007/978-1-4471-4640-7\_1]
- [31] Herrera D, Kannala J, Heikkilä J. Accurate and practical calibration of a depth and color camera pair. In *International Conference on Computer analysis of images and patterns* 2011 Aug 29 (pp. 437-445). Springer, Berlin, Heidelberg. [doi.org/10.1007/978-3-642-



- 23678-5\_52]
- [32] Yamazoe H, Habe H, Mitsugami I, Yagi Y. Easy depth sensor calibration. In Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012) 2012 Nov 11 (pp. 465-468). IEEE.
- [33] Raposo C, Barreto JP, Nunes U. Fast and accurate calibration of a kinect sensor. In 2013 International Conference on 3D Vision-3DV 2013 2013 Jun 29 (pp. 342-349). IEEE. [doi.org/10.1109/3DV.2013.52]
- [34] Zhang C, Zhang Z. Calibration between depth and color sensors for commodity depth cameras. In Computer vision and machine learning with RGB-D sensors 2014 (pp. 47-64). Springer, Cham. [doi.org/10.1007/978-3-319-08651-4\_3]
- [35] Zollhöfer M, Martinek M, Greiner G, Stamminger M, Süßmuth J. Automatic reconstruction of personalized avatars from 3D face scans. Computer Animation and Virtual Worlds. 2011 Apr;22(2-3):195-202. [doi.org/10.1002/cav.405]
- [36] Berdnikov Y, Vatolin D. Real-time depth map occlusion filling and scene background restoration for projected-pattern based depth cameras. In Graphic Conf., IETP 2011.
- [37] Qi F, Han J, Wang P, Shi G, Li F. Structure guided fusion for depth map inpainting. Pattern Recognition Letters. 2013 Jan 1;34(1):70-6. [doi.org/10.1016/j.patrec.2012.06.003]
- [38] Schmeing M, Jiang X. Color segmentation based depth image filtering. In International Workshop on Depth Image Analysis and Applications 2012 Nov 11 (pp. 68-77). Springer, Berlin, Heidelberg. [doi.org/10.1007/978-3-642-40303-3\_8]
- [39] Chen L, Lin H, Li S. Depth image enhancement for Kinect using region growing and bilateral filter. In Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012) 2012 Nov 11 (pp. 3070-3073). IEEE.
- [40] Hornacek M, Rhemann C, Gelautz M, Rother C. Depth super resolution by rigid body self-similarity in 3d. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition 2013 (pp. 1123-1130). [doi.org/10.1109/CVPR.2013.149]
- [41] Hu X, Yuan Yu Y, Zhong Wang Z. High-Definition 3D Reconstruction in Real-Time from a Moving Depth Sensor. In 2013 International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information (ICACSEI 2013) 2013 Aug. Atlantis Press. [doi.org/10.2991/icacsei.2013.94]
- [42] Henry P, Krainin M, Herbst E, Ren X, Fox D. RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. In Experimental robotics 2014 (pp. 477-491). Springer, Berlin, Heidelberg. [doi.org/10.1007/978-3-642-28572-1\_33]
- [43] Newcombe RA, Izadi S, Hilliges O, Molyneaux D, Kim D, Davison AJ, Kohi P, Shotton J, Hodges S, Fitzgibbon A. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2011 Oct 26 (pp. 127-136). IEEE. [doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378]
- [44] Izadi S, Newcombe RA, Kim D, Hilliges O, Molyneaux D, Hodges S, Kohli P, Shotton J, Davison AJ, Fitzgibbon A. Kinectfusion: real-time dynamic 3d surface reconstruction and interaction. In ACM SIGGRAPH 2011 Talks 2011 Aug 7 (p. 23). ACM. [doi.org/10.1145/2037826.2037857]
- [45] Taher Tolou Del M.S, Kamali Tabrizi S. Interpretation of Architectural Elements in the Integrated Style of Etemad al-Saltaneh House of Tehran, First National Conference on Documentation of Natural and Cultural Heritage, Tehran, Shahid Rajaei University, 2016. [in Persian]  
[طاهر طلوع دل محمدصادق، کمالی تبریزی سینا. برداشت عناصر معماری در سبک تلفیقی خانه اعتمادالسلطنه تهران. نخستین همایش ملی مستندنگاری میراث طبیعی و فرهنگی، تهران، دانشگاه شهید رجایی، ۱۳۹۶.]
- [46] Pearson K. VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. Proceedings of the royal society of London. 1895 Dec 31;58(347-352):240-2. [doi.org/10.1098/rspl.1895.0041]