



الگوریتم جدید فشرده سازی غیراتلافی ابرنقاط با تلفیق سری الگوهای کد گری نورساختاریافته و فشرده سازی ماتریس تک کاناله دوبعدی

حسین رشیدی زاده¹، محمد مراد شیخی^{2*}، غلامرضا اکبری زاده³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

* صندوق پستی 1678815811، m.sheikhi@srutu.edu، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 مرداد 1396

پذیرش: 10 آبان 1396

ارائه در سایت: 06 آذر 1396

کلید واژگان:

فشرده سازی ابر نقاط

اسکنر سه بعدی

اندازه گیری نوری

کد گری

نور ساختاریافته

چکیده

با پیشرفت و توسعه روش‌های اندازه‌گیری سه بعدی غیرتماسی در طول دو دهه اخیر، به موازات ارتقاء سرعت عملیات اسکن و دقت در اندازه‌گیری و رشد قابل توجه کاربرد آن در گستره وسیعی از زمینه‌ها (نظیر طراحی، مهندسی معکوس، بازرسی و کنترل کیفی، پزشکی، مستندسازی اشیاء، روباتیک و غیره) افزایش حجم اطلاعات بدست آمده (ابرنقاط) از دستگاه اسکنر سه‌بعدی به‌عنوان خروجی عملیات اسکن مشاهده می‌شود. و این مسئله موجب بروز محدودیت‌هایی در زمینه مدیریت داده، انتقال داده، ذخیره‌سازی داده و یا حتی توسعه روش‌های اسکن بلادرنگ می‌گردد. بدین وسیله ضرورت فشرده‌سازی و کم کردن حجم این مقدار داده با حفظ و یا حداقل میزان افت در دقت و کیفیت به‌عنوان یکی از موضوعات مطالعاتی مورد توجه در زمینه پردازش پسین عملیات اسکن بیش از پیش آشکار شده است. این تحقیق با ارائه روشی نو و متمایز جهت فشرده‌سازی بدون اتلاف ابرنقاط بدست آمده از عملیات اسکن سه بعدی در قالب یک تصویر دو بعدی تک کاناله معمولی، مبتنی بر روش‌های فشرده‌سازی داده‌های سه‌بعدی براساس تصویر، ضمن طراحی و ساخت یک دستگاه اسکنر سه بعدی غیرتماسی با الگوی نورساختاریافته مبتنی بر تکنیک کدگری، کارایی روش مطرح شده را مورد ارزیابی عملی قرار داده است. نتایج بدست آمده حاکی از صحت و کاربردی بودن این ایده و دستیابی به نرخ فشرده‌سازی متمایز [230:1] در میان سایر روش‌های فشرده‌سازی غیراتلافی داده‌های سه‌بعدی می‌باشد.

Point-cloud lossless compression new algorithm by merging gray-coded structured light series patterns and compression of two-dimensional single channel matrix

Hossein Rashidizad¹, Mohmmad Morad Sheikhi^{1*}, Gholam Reza Akbarizadeh²

1-Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2-Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

* P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, m.sheikhi@srutu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 23 July 2017

Accepted 01 November 2017

Available Online 27 November 2017

Keywords:

Point Cloud Compression

3d scanner

Optical measuring

Gray code

Structured light

ABSTRACT

According to the development of non-contact three-dimensional measurement methods over the past two decades, along with the acceleration of scanning operations and the accuracy in measuring and significant development of their application in a wide range of fields (such as design, reverse engineering, quality control and inspection, medicine, documentation of objects, robotics, etc.), we have seen an increase in the amount of information obtained (points cloud) from the 3D scanner as the output of the scan operation. This raises restrictions on data management, data transfer, data storage, or even the development of real-time scanning methods. In this way, the need to compress and reduce the amount of data with the preservation of accuracy or minimum drop in accuracy and quality as one of the issues of interest in the post-processing of scanning operations has been revealed more than ever before. In this paper with presenting a new and distinct method for lossless compression on points cloud obtained from 3D scan operations in the form of an ordinary single-channel 2D image based on the image-based encoding techniques, we have evaluated the performance and effectiveness of the proposed method, while designing and constructing a non-contact 3D scanner with structured-light pattern based on the Gray code technique. The results show the accuracy and applicability of this method and the achievement of distinct compression rate [230:1] among other lossless compression methods of 3D data.

Please cite this article using:

H. Rashidizad, M. M. Sheikhi, Gh. R. Akbarizadeh, Point-cloud lossless compression new algorithm by merging gray-coded structured light series patterns and compression of two-dimensional single channel matrix, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 371-379, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

غیرمستقیم^{۱۳} و مستقیم^{۱۴} برای فشرده سازی آن وجود دارد [9]. روش اول تبدیل مدل ابرنقاط به مدلی دیگر نظیر مش‌های چندوجهی^{۱۵}، سطوح پارامتریک^{۱۶} (نظیر نرېزها^{۱۷}) و یا پیکسل‌های حجمی (وکسل‌ها^{۱۸}) است [3]، که در این زمینه به علت ارجحیت و اهمیت مش‌های چندوجهی در گرافیک کامپیوتری و مدل‌سازی سه بعدی و همچنین حجم بالای دیتای مورد نیاز آنها روش‌های متنوعی مطرح شده است، که در این خصوص می‌توان به مرور انجام شده توسط گاتسمن [11,10] اشاره داشت. هرچند که این تبدیل مدل غالباً از نظر محاسبات و پردازشگر سنگین و زمان‌بر است. روش دیگر فشرده‌سازی مستقیم ابرنقاط بوده که بسیاری از محققین در طول سال‌های اخیر به آن پرداخته‌اند. بطور مثال اشنایل و همکاران [12] روشی را جهت انکود کردن ابرنقاط بصورت سلول‌های درخت هشت‌تایی داده^{۱۹} مطرح نمود که بر مبنای تقریب سطح محلی^{۲۰} فشرده‌سازی را انجام می‌دهد. ژانگ و همکاران [13] در تکنیکی دیگر مبتنی بر ساختار داده درخت هشت‌تایی داده، با تعریف گراف تبدیل^{۲۱}، ابرنقاط را فشرده می‌سازد. داربویو و همکاران [14] نیز با ارائه روشی مبتنی بر جزءبندی^{۲۲} ابرنقاط بصورت منحنی‌های فضایی سه‌بعدی^{۲۳}، فشرده‌سازی را انجام دادند. علیرغم موفقیت این تکنیک‌ها، همگی مستلزم ایجاد یک طرح ویژه برای برقراری ارتباط میان نقاط و تقریب‌زنی و پیش‌بینی دقیق اند. با عنایت به این مهم، مزیت روش‌های فشرده‌سازی داده‌های سه‌بعدی مبتنی بر تصویر^{۲۴} نظیر تکنیک هولوایمیج^{۲۵}، یا تصاویرهندسی^{۲۶} با بهره‌گیری از الگوریتم‌های توسعه‌یافته موجود در زمینه فشرده‌سازی تصاویر دوبعدی آشکار میشود. تکنیک هولوایمیج توسط ژانگ و همکاران [15] با استفاده از ویژگی روش نورساختاریافته با طرح فرینج انتقال فاز^{۲۷} سه مرحله‌ای که در اندازه‌گیری‌های سه بعدی بسیار بکار می‌رود ارائه شد. در این روش با استفاده از سه کانال رنگی تصاویر (RGB²⁸)، اطلاعات هندسی آبجکت در یک تصویر دوبعدی با نرخ فشرده‌سازی [72:1] در حالت بدون اتلاف^{۲۹} و با نرخ [370:1] در حالت اتلافی^{۳۰} نسبت به فرمت داده سه‌بعدی OBJ تعبیه می‌شود [5]. هرچند که تکنیک هولوایمیج کارآمدی نسبتاً مناسبی برای فشرده‌سازی داده‌های سه بعدی از خود نشان میدهد، اما مسئله استفاده از 24 بیت برای ارائه مختصات ابرنقاط و صرف هر سه کانال رنگی (قرمز، سبز و آبی) و در عین حال نرخ فشرده‌سازی پایین در حالت عدم اتلاف، موجب گردید تا مطالعاتی جهت توسعه و بهبود آن در طول سال‌های اخیر صورت پذیرد، نظیر تلاش یجون‌وانگ [16] با ارائه روشی جهت تولید تصاویر هولوایمیج دو کاناله. و یا دیگر تکنیک تصاویرهندسی که توسط ژیان‌فنگ و همکاران [17] با برش دادن مدل سه بعدی و نگاشت آنها بر روی یک سطح دوبعدی ارائه گردید، اما مسئله نیاز به حجم پردازش زیاد از محدودیت‌های عملیاتی آن محسوب می‌شود.

اسکنر سه بعدی، دستگاهی است که با هدف جمع‌آوری داده‌های مربوط به شکل، ابعاد و احیاناً سایر مشخصات ظاهری (نظیر رنگ، نقشه نرمال سطح و...) اشیاء و محیط پیرامون خود، آنالیزهای لازم را انجام می‌دهد و از داده‌های بدست آمده جهت بازسازی^۱ و ایجاد مدل ابرنقاط^۲ مورد استفاده در گستره وسیعی از صنایع و کاربردها (نظیر طراحی و ساخت، مهندسی معکوس، رباتیک، پزشکی، کنترل کیفیت، سینما، صنعت سرگرمی (مانند سنسورکینکت^۳) و غیره) استفاده میشود [1]. بطور کلی اسکنرهای سه بعدی بر اساس ضرورت تماس سنسور با سطح قطعه به دو دسته تماسی^۴ و غیرتماسی^۵، و در ادامه نیز اسکنرهای غیرتماسی بر اساس امکان تابش پرتو به دو گروه فعال^۶ و غیرفعال^۷ تقسیم بندی میشوند. بدین ترتیب در ذیل این تقسیم بندی‌ها، تنوع تکنیک‌ها و روش‌های پیاده‌سازی اسکنر سه‌بعدی با مزایا و معایب خاص خود مشاهده می‌شوند [2]. با پیشرفت و توسعه روش‌ها و تکنیک‌های اندازه‌گیری سه بعدی در طول دو دهه اخیر، به موازات ارتقاء سرعت و دقت در اندازه‌گیری و رشد قابل توجه موارد کاربرد آن در زمینه‌های متنوع رباتیک، حجم اطلاعات بدست آمده (ابرنقاط) از دستگاه اسکنر سه بعدی به‌عنوان خروجی عملیات اسکن افزایش یافته‌اند و این مسئله موجب بروز محدودیت‌هایی در زمینه مدیریت، پردازش، انتقال داده، ذخیره‌سازی داده و یا حتی توسعه روش‌های اسکن کردن بلادرنگ^۸ شده است. بدین وسیله ضرورت فشرده‌سازی و کم کردن حجم این مقدار داده با حفظ و یا حداقل میزان افت در دقت و کیفیت به‌عنوان یکی از موضوعات مطالعاتی مورد توجه در زمینه پردازش پسین^۹ عملیات اسکن بیش از پیش ضروری بنظر می‌رسد [3]. بطور مثال برای یک مدل ابرنقطه بدست آمده از اسکنر نور ساختاریافته، توصیف مختصات هر نقطه آن توسط سه مولفه (x,y,z) می‌تواند مستلزم اختصاص سه تغییر اعشاری چهار بایتی (32 بیتی) از نوع شناور^{۱۰} باشد که در نتیجه 12 بایت (96 بیت) برای هر نقطه مصرف خواهد شد [4]. حال اگر اطلاعات مربوط به اتصالات نقاط نیز که در بسیاری از فرمت‌های سه بعدی رایج است اضافه شود، حجم دیتا به بیش از ده برابر حدود 13 مگابایت می‌رسد [5]، که این مسئله با افزایش رزولوشن دوربین و سرعت عملیات اسکن ایجاد محدودیت عملیاتی خواهد نمود. بطور مثال تصویربرداری با سرعت 60 فریم در ثانیه برای رزولوشن دوربین 480×640 پیکسل، منجر به تولید نرخ انتقال داده 228 مگابایت در ثانیه (ناشی از تولید 1.8 میلیون نقطه در هر ثانیه) خواهد شد که هم در ذخیره‌سازی و انتقال داده بسیار مشکل است [6]، چراکه در یک اسکنر سه بعدی مدرن لیزری تجاری مانند سرفیزر^{۱۱} می‌توان در نرخ بالای 1.2 میلیون نقطه در هر ثانیه [7] و یا در اسکنرهای مدرن مجهز به الگوهای تصویری نظیر فرینج^{۱۲} به مقادیر به مراتب بیشتر نظیر 8.9 میلیون نقطه در هر ثانیه دست یافت [8].

در طول دهه اخیر تحقیقات متعددی درخصوص فشرده‌سازی داده‌های سه بعدی انجام شده است. از آنجا که داده‌های بدست آمده از اسکنر سه‌بعدی در حالت اصلی و اولیه خود بصورت ابر نقاطاند، بطور کلی دو روش

¹³ In-direct compression¹⁴ Direct compression¹⁵ Polygonal Mesh¹⁶ Parametric Surfaces¹⁷ Non-uniform rational basis spline (NURBS)¹⁸ Voxels¹⁹ Octree²⁰ Local surface approximations²¹ Graph transform²² Partitioning²³ 3D space curves²⁴ Image-based encoding²⁵ Holomage²⁶ Geometry Images²⁷ Phase-shifting fringe-projection system²⁸ Red-green-blue²⁹ Lossless compression³⁰ Lossy compression¹ Reconstruction² Point cloud³ Kinect⁴ Contact scanner⁵ Non-contact scanner⁶ Active⁷ Passive⁸ Realtime⁹ Post-processing¹⁰ Float¹¹ Surphaser-100HSX¹² Fringe-projection-pattern

بدیهی است که در روش فعال، اسکن تمام سطح قطعه با الگوی تک نقطه‌ای (نظیر لیزر نقطه ای) بسیار زمان‌بر است. ولذا با استفاده از یک خط (لیزر خطی)، میتوان تعداد نقاط بیشتری را تولید نمود (شکل 2)، هرچند که این حالت نیز مستلزم صرف زمان کافی جهت پوشش کامل سطح قطعه توسط خط نور (چرخش شی و یا حرکت منبع نور) و تصویربرداری پی‌درپی می‌باشد. تک‌تک پیسکل‌های متناظر با طرح لیزر بر روی سطح شیء، طی الگوریتم‌های پردازش تصویر استخراج و تحلیل شده و برای هر موقعیت آنها، یک مختصات سه بعدی بدست می‌آید.

حال لازم است جهت محاسبه مختصات سه‌بعدی ابرنقاط، برای تک‌تک پیکسل‌های متعلق به سطح جسم در صفحه تصویر دوربین³، روش مثلث‌بندی را پیاده نمود. که بدین منظور می‌توان مطابق رابطه (2) و شکل 3 تعریفی از بردارهای فضایی پرتوهای نور ارسالی و دریافتی توسط منبع نور و دوربین دیجیتال (L_1 و L_2) جهت محاسبه نقطه تقاطع آن دو بردار ارائه داشت:

$$\begin{aligned} L_1 &= \{p_1 = q_1 + \lambda_1 v_1 : \lambda_1 \in R\} \\ L_2 &= \{p_2 = q_2 + \lambda_2 v_2 : \lambda_2 \in R\} \end{aligned} \quad (2)$$

از آنجا که ممکن است دو بردار تعریف شده L_1 و L_2 در شرایط عملی آزمایش، دقیقاً همدیگر را در یک نقطه قطع نکنند، نقطه تقاطع تقریبی این دو بردار بر مبنای حداقل فاصله تفاضل مربعات دو بردار از نقطه تقاطع تحت عنوان تابع $\emptyset$ می‌توان رابطه (3) را تعریف کرد:

$$\emptyset(p, \lambda_1, \lambda_2) = \|q_1 + \lambda_1 v_1 - p\|^2 + \|q_2 + \lambda_2 v_2 - p\|^2 \quad (3)$$

تابع $\emptyset$ شامل پنج متغیر می‌باشد (سه متغیر مختصات سه بعدی نقطه p

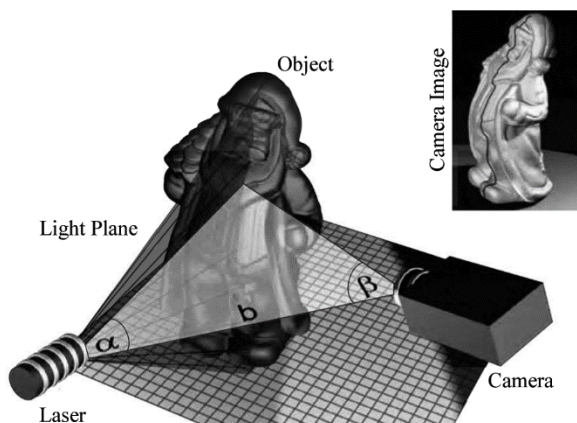


Fig. 2 Triangulation by using linear light [2]

شکل 2 مثلث بندی با بکارگیری نور خطی [2]

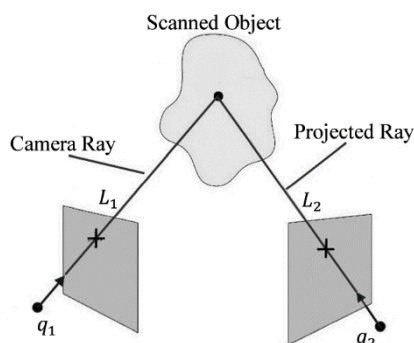


Fig. 3 Approximation of intersection point from two rays

شکل 3 تقریب نقطه تقاطع میان دو پرتو ارسالی و دریافتی

در این مقاله نیز مبتنی بر روش‌های فشرده‌سازی داده‌های سه‌بعدی براساس تصویر، با ارائه روشی نو جهت فشرده‌سازی بدون اتلاف ابرنقاط، فقط با استفاده از یک کانال تصویر دوبعدی و همچنین کدگذاری و تعبیه اطلاعات متعلق به پارامترهای کالیبراسیون سیستم نورساختاریافته در همان تصویر (جهت مستقل نمودن عملیات بازایی ابرنقاط از مشخصات پیکربندی سیستم و سنسورها)، ضمن طراحی و ساخت یک دستگاه اسکنر سه بعدی غیرتماسی با الگوی نور ساختار یافته مبتنی بر الگوی کدگری¹، کارایی روش مذکور را مورد ارزیابی عملی قرار داده است. نتایج بدست آمده حکایت از صحت و کاربردی بودن روش مذکور و دستیابی به نرخ فشرده‌سازی متمایز [230:1] در میان سایر روش‌های فشرده‌سازی غیراتلافی داده‌های سه‌بعدی دارد.

2- اسکن با روش نور ساختاریافته

2-1- مثلث بندی

اساس روش مثلث بندی² بر این حقیقت است که یک مثلث با تعریف طول یک ضلع و زاوای مجاور آن قابل تعیین می‌باشد. سیستم‌های اندازه‌گیری نوری نیز از همین اصل جهت محاسبه هندسه و مختصات فضایی بهره می‌گیرند [2]. به‌عنوان مثال، با قرار دادن دو سنسور (نظیر دوربین دیجیتال و منبع نور لیزر) در موقعیت دو راس از یک مثلث روبروی یک شیء (راس سوم)، بواسطه اندازه خط واصل بین دو سنسور (b) و زاوای مجاور آن (α و β)، می‌توان ارتفاع مثلث (z) (یا فاصله سنسور با شیء) را با رابطه (1) محاسبه نمود (شکل 1).

$$z = \frac{b \sin \alpha \sin \beta}{\sin \gamma}, \quad \gamma = \pi - \alpha - \beta \quad (1)$$

بطور معمول روش‌های اسکن غیرتماسی به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی میشوند. در روش‌های غیرفعال، با تحلیل موقعیت پیکسل‌ها با توجه به صفحات متناظر تصویر، اطلاعات بدست می‌آید. از سوی دیگر روش‌های فعال مستلزم نورپردازی خاص شیء تحت اسکن با ساختاری ویژه است (الگو و طرح هندسی نور شناخته شده باشد، نظیر خطوط و نقاط معین). با پروژکت کردن الگوی مذکور (توسط لیزر، پروژکتور) بر روی سطح شیء و تصویربرداری از آن توسط دوربین، بواسطه معین بودن موقعیت نور، محاسبه مختصات نقاط سطح متناظر با پیکسل‌ها طی عملیات پردازش تصویر، ممکن خواهد شد [18]. عمده سیستم‌های اسکن سه بعدی مورد استفاده در صنعت مبتنی بر روش فعال‌اند، که شاهد تنوع پیکربندی و سنسورهای مورد استفاده در آنها هستیم.

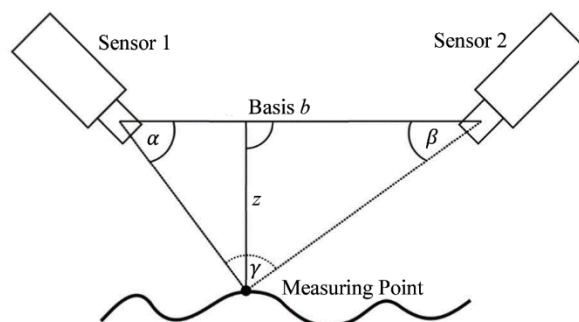


Fig. 1 Principle of triangulation

شکل 1 اصل مثلث بندی

³ Image frame

¹ Graycode

² Triangulation

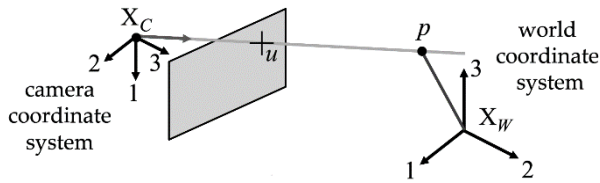


Fig. 5 Define global and camera coordinate systems

شکل 5 تعریف دو دستگاه مختصات دوربین و مرجع

تعریف می‌شوند.

از سوی دیگر به تناسب نوع سنسور مورد استفاده و فاصله آن با لنز دوربین و همچنین میزان انحراف و اعوجاج پیکسل‌های تصویر نسبت به واقعیت، لازم است رابطه (8) را با ماتریس ضرایب K اصلاح نمود (روابط 9 و 10). این ماتریس را تحت عنوان پارامترهای ذاتی² دوربین می‌شناسند [19].

$$K = \begin{bmatrix} f_{s1} & f_{s\theta} & o^1 \\ 0 & f_{s2} & o^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\lambda v = K(R p_w + T) \quad (10)$$

که در آن f معرف فاصله کانونی بوده و پارامترهای f_{s1} و f_{s2} به ترتیب پارامترهای اول و دوم ابعاد (مقیاس³) مختصات می‌باشند. از آنجا که در برخی سنسور دوربین‌ها پیکسل‌ها مربعی شکل نیستند، دو پارامتر f_{s1} و f_{s2} ضروری‌اند. پارامتر $f_{s\theta}$ برای جبران شیب صفحه تصویر بوده و در نهایت o^1 و o^2 مختصات تصویر محل تقاطع خط عمودی در مختصات دوربین با صفحه تصویر است که این نقطه را بنام مرکز تصویر⁴ و یا نقطه اصلی⁵ می‌شناسند [20]. پارامترهای ذاتی و عارضی دوربین در مرحله کالیبراسیون تعیین می‌گردند.

2-2-1- کالیبراسیون سنسورها

همان‌طور که در بخش 2-2 بیان شد، بمنظور مثلث‌بندی بین پرتوهای نور ارسالی و دریافتی توسط دو سنسور اسکتر، لازم است تا پارامترهای عارضی و ذاتی دوربین و منبع نور طی فرآیند کالیبراسیون تعیین شوند. با توجه به تکنیک مورد استفاده در این پژوهش مبنی بر استفاده از ویدیوپروژکتور به‌عنوان منبع نور، لازم است علاوه بر دوربین، کالیبراسیون پارامترهای ذاتی پروژکتور نیز انجام شود. چراکه مشابه دوربین، پیکسل‌های طرح یا الگوی تابش یافته از سوی پروژکتور، تحت تأثیر فاصله کانونی و مشخصات لنز پروژکتور قرار خواهند گرفت.

دوربین و ویدیو پروژکتور مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب لاجیتک⁶ و اپسون⁷ از نوع فناوری سه‌چیپ‌ال‌سی‌دی⁸ می‌باشند (شکل 6).

عملیات کالیبراسیون بر مبنای روش ژانگ [19] انجام گرفت که نتایج آن در جداول 1 و 2 ارائه شده است. مطابق این روش با بهره‌گیری از یک الگوی شطرنجی با ابعاد مشخص و ثبت تصاویر آن در زوایا و فواصل مختلف، میتوان به پارامترهای مدنظر دست یافت. کالیبراسیون پروژکتور نیز براساس روش دوربین معکوس با استفاده از نتایج کالیبراسیون دوربین تعیین گردیده شد [21,20].

و دو ضریب اسکالر λ_1 و λ_2 ، حال اگر نقطه p_{12} را به‌عنوان نقطه‌ای با فاصله یکسان از p_1 و p_2 تعریف شود (رابطه 4):

$$p_{12} = p_1 + \frac{1}{2}(p_2 - p_1) = p_2 + \frac{1}{2}(p_1 - p_2) \quad (4)$$

شرط لازم جهت مینیمم‌سازی تابع ϕ آن است که مشتق نسبی این تابع، نسبت به پنج متغیر آن در شرایط به حداقل رسانی فاصله بین دو نقطه p_1 و p_2 به صفر نزدیک شوند، و یا به تعبیر دیگر لازم است تا نقطه میانی فاصله بین این دو نقطه، همان نقطه p باشد (شکل 4).

در این حالت مسئله به حداقل‌سازی مربع فاصله بین نقطه p_1 از خط L_1 و نقطه p_2 از خط L_2 محدود می‌گردد. ولذا تابع ψ مطابق رابطه (5) تعریف می‌گردد:

$$\psi(\lambda_1, \lambda_2) = 2\phi(p_{12}, \lambda_1, \lambda_2) = \|(q_2 + \lambda_2 v_2) - (q_1 + \lambda_1 v_1)\|^2 \quad (5)$$

حال مطابق شرط بیان شده لازم است مشتقات نسبی تابع ψ نسبت به مقادیر λ_1 و λ_2 در حالت بهینه به صفر نزدیک شوند (روابط 6).

$$\frac{\partial \psi}{\partial \lambda_1} = v_1^t (\lambda_1 v_1 - \lambda_2 v_2 + q_1 - q_2) = \lambda_1 \|v_1\|^2 - \lambda_2 v_1^t v_2 + v_1^t (q_1 - q_2) = 0$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \lambda_2} = v_2^t (\lambda_2 v_2 - \lambda_1 v_1 + q_2 - q_1) = \lambda_2 \|v_2\|^2 - \lambda_1 v_2^t v_1 + v_2^t (q_2 - q_1) = 0 \quad (6)$$

دستگاه معادلاتی فوق را می‌توان به روش ماتریس معکوس مطابق رابطه (7) حل نمود.

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \|v_1\|^2 & -v_1^t v_2 \\ -v_2^t v_1 & \|v_2\|^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} v_1^t (q_2 - q_1) \\ v_2^t (q_1 - q_2) \end{pmatrix} \quad (7)$$

در نتیجه مشاهده می‌شود که تقریب‌زنی نقطه تقاطع p با دستیابی به دو مقدار بهینه λ_1 و λ_2 مطابق رابطه (7)، صورت خواهد پذیرفت.

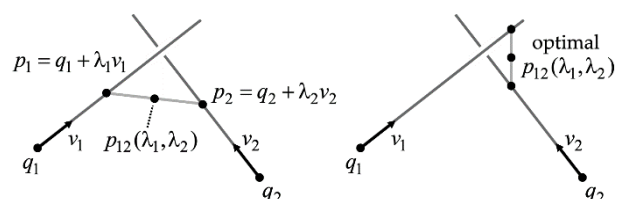
2-2-2- دستگاه‌های مختصاتی

محاسبه نقطه تقاطع p در بخش 1-2 به روش مثلث‌بندی فارغ از دستگاه مختصاتی انجام گرفت. از آنجا که در عمل، نگاشت اولیه ابرنقاط بر روی صفحه دوبعدی سنسور دریافت تصویر دوربین صورت می‌پذیرد و اندازه‌گیری در این صفحه بر مبنای واحد پیکسل انجام میشود، لازم است تا یک دستگاه مختصات دیگر را تعریف و در نقطه کانونی دوربین ضمیمه کرد. در چنین شرایطی، نقطه سه‌بعدی p در دو دستگاه مختصات مرجع و دستگاه مختصات دوربین مطابق شکل 5 به ترتیب با بردارهای p_w و p_c تعریف می‌گردد.

بر اساس موقعیت و همچنین جهت دو دستگاه مختصات مذکور، دو بردار p_w و p_c به کمک بردار انتقال T و همچنین ماتریس دوران R ، مطابق رابطه (8) به یکدیگر مرتبط می‌شوند.

$$p_c = R p_w + T \quad (8)$$

بردار T و ماتریس R ، به‌عنوان پارامترهای عارضی¹ دوربین، بر مبنای موقعیت و جهت دستگاه مختصات دوربین نسبت به دستگاه مختصات مرجع

Fig. 4 middle point for arbitrary and optimized of λ_1 and λ_2 values

شکل 4 نقطه میانی p_{12} برای دو مقدار دلخواه λ_1 و λ_2 و برای مقادیر بهینه

² Intrinsic parameters

³ Coordinate scale parameters

⁴ Image center

⁵ Principal point

⁶ Logitech HD Pro c920

⁷ Epson EB-S02

⁸ 3LCD 3-chip technology

¹ Extrinsic parameters

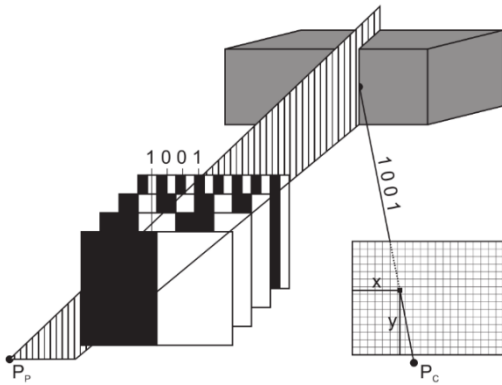


Fig. 7 Encoding of projected series patterns [2]

شکل 7 کدگذاری سری الگوهای نور تابانده [2]

روش انتقال فاز یک نوع از تکنیک‌های کدگذاری نور با استفاده از چند الگوی دوره ای سینوسی است (بسته به الگوریتم پیاده‌سازی می‌تواند شامل سه و یا تعداد بیشتری الگو باشد) [22]. که در هر گام از آن، الگوی سینوسی با مقدار زاویه‌ای مشخص بطور طولی توسعه می‌یابد. بطور کلی، الگوهای لبه‌ای² برای یک الگوریتم N -الگویی با انتقال فاز یکسان می‌تواند بصورت رابطه (11) تعریف شود:

$$I_n(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left(\varphi + \frac{2\pi n}{N}\right) \quad (11)$$

که در آن $I'(x, y)$ معرف میانگین شدت نور³، $I''(x, y)$ مدولاسیون شدت نور⁴، $\varphi(x, y)$ مقدار فاز مجهول جهت تعیین برای n تعداد الگو می‌باشد. حل این معادلات منجر به کشف مقدار فاز $\varphi(x, y)$ مطابق رابطه (12) می‌گردد (شکل 8).

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \quad (12)$$

لیکن مقدار فاز بدست آمده از رابطه فوق در دامنه $-\pi$ تا $+\pi$ دارای ناپوستگی‌هایی⁵ در فاز 2π است. ولذا مقادیر یکتای بدست آمده برای پیکسل‌ها (جهت تمایزبخشیدن با سایر طرح) در طی دوره‌های سینوس تکرار می‌شود. حل این مشکل می‌تواند توسط الگوریتم‌های بازگشایی فاز⁶ [23] و یا روش کدگذاری گری‌کد انجام پذیرد [2].

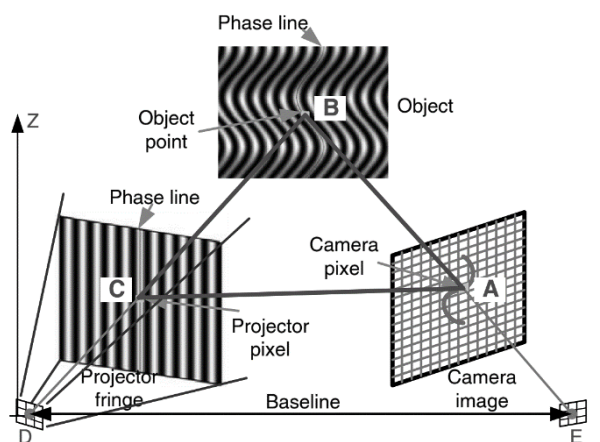


Fig. 8 Triangulation in phase-shifting technique [23]

شکل 8 مثلث بندی در روش انتقال فاز [23]

² Fringe patterns³ Average intensity⁴ Intensity modulation⁵ Discontinuities⁶ Phase-unwrapping algorithm

Fig. 6 used camera and video-projector as 3d scanner sensors

شکل 6 استفاده از دوربین و پروژکتور به‌عنوان دو سنسور اسکنر سه‌بعدی

جدول 1 نتایج کالیبراسیون (پارامترهای ذاتی)

Table 1 Calibration results (intrinsic parameters)

دوربین	پروژکتور	
[1161.7402 1159.2762]	[1518.0019 1516.2345]	فاصله کانونی
[800.0003 455.8607]	[505.2981 692.2772]	مرکز تصویر
[0.0970 -0.0255 0.0019 0.0029 0.0000]	[-0.0499 -0.0367 0.0000 0.0000 0.0000]	اعوجاج

جدول 2 نتایج کالیبراسیون (پارامترهای عارضی)

Table 2 Calibration results (extrinsic parameters)

دوربین	پروژکتور	
[0.9709 -0.0088 - 0.2392 ; -0.0714 - 0.9645 -0.2544 ; - 0.2284 0.2641 - 0.9371]	[0.9601 -0.0538 - 0.2743 ; -0.0015 - 0.9803 -0.1974 ; - 0.2796 0.1900 - 0.9411]	ماتریس دوران R
[-114.6089 99.4552 768.8317]	[347.8824 10.9695 768.8317]	بردار انتقال T

2-3 روش‌های پیاده سازی تکنیک مثلث بندی

مزیت معرفی پروژکتور به عنوان منبع نور ساختاریافته، حذف ضرورت حرکت منبع نور جهت پوشش¹ تمام سطح قطعه (نظیر استفاده از لیزر خطی) و ارتقا چشم گیر در سرعت عملیات اسکن است. چراکه با فرض آنکه عرض رزولوشن تصویر تابش یافته از سوی پروژکتور 1024 پیکسل باشد، در نتیجه می‌توان به این تعداد، تصویر از جابجایی یک ستون سفیدرنگ تک پیکسلی در زمینه سیاه رنگ بدست آورد که این هدف می‌تواند با استفاده از پروژکتور و پروجکت کردن یکسری نوارهای متناوب رنگی (نظیر سیاه و سفید) صورت پذیرد. در این حالت، هر خط مرزی میان نوار سیاه و سفید، معادل یک خط تابانده شده است. اما انجام عملیات پردازش تصویر مستلزم تفکیک این خطوط از یکدیگر بمنظور ایجاد نگاشت صحیح میان هر خط استخراج شده با نوار پروجکت شده متناظر آن می‌باشد. بدیهی است حل این مسئله مستلزم کدگذاری الگوی نور تابانده شده می‌گردد (شکل 7).

¹ Sweep

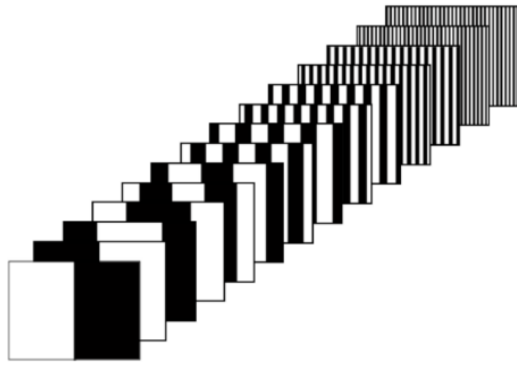


Fig. 10 Series of structured light patterns based on graycode

شکل 10 سری الگوهای تصویری نورساختاریافته مبتنی بر کد گری

نظیر تصاویرهندسی [17] و یا هولوایمینگ [15] مطرح گردید. در پژوهش حاضر، پس از پروجکت کردن سری الگوهای تصویری گری کد بر روی سطح شیء تحت اسکن و انجام عکسبرداری، با تلفیق آنها با یکدیگر می توان با استفاده از "الگوریتم 1" به تک تصویر (ماتریس دوبعدی) شیب داری⁸ با مقادیر یکتا⁹ برای هر نوار دست یافت (شکل 11). در مرحله پردازش تصویر شیبدار خاکستری، با تکرار عملیات مثلث بندی برای تک تک پیکسل های هر نوار میتوان فرآیند تولید ابرنقاط را به انجام رساند. از آنجا که درایه های ماتریس مذکور را میتوان با توزیع در دامنه مقداری صفر تا 255 تعریف نمود، ذخیره سازی این ماتریس در قالب یک تصویر تک کاناله مقیاس خاکستری¹⁰ میسر خواهد شد. از دیگر اهداف روش پیشنهادی، امکان بازیابی ابرنقاط اولیه بدون نیاز به

الگوریتم 1 الگوریتم پیشنهادی جهت تولید تصویر شیبدار خاکستری

Algorithm. 1 Proposed algorithm for generating gradient grayscale image

```

1:  $n$  = images (number of captured GrayCode series images)
2:  $\{h, w\}$  = read width and height of image
3: Create MergedMatrix =  $h \times w \times n$  empty 3D Array
4: Create GradientMatrix =  $h \times w$ 
5: for each image ( $i=1:n$ )
6: Read each pixel_intensity
7: if pixel_intensity > 0 do
8: pixel_intensity = 1
9: else
10: pixel_intensity = 0
11: end if
12: MergedMatrix(pixel at  $n$ ) = pixel_intensity
13: end for
14: GrayCode_Array = [series of gray codes ....]
15: for  $j=1:h$ 
16: for  $k=1:w$ 
17: read values of MergedMatrix( $j, k, 1:n$ ) to generate graycode_string
18: convert graycode_string to decimal_value
19: GradientMatrix( $j, k$ ) = decimal_value
20: end for
21: end for

```

⁸ Gradient

⁹ Unique values

¹⁰ Grayscale

3- بکارگیری الگوی کدگری

کدگری برگرفته از نام مولف آن¹ روشی جهت نمایش کدهای باینری² است که هر دو عدد متوالی آن برخلاف کدباینری فقط در یک بیت اختلاف دارند. همین ویژگی موجب دقت و تصحیح خوانش کدها در اثر نویز و سایر خطاها میشود. جدول 3 سری کدهای معادل دودهی³، دودویی و گری کد را نمایش می دهد.

امروزه این روش کدگذاری بطور گسترده در سیستم های ارتباط دیجیتال مورد استفاده قرار می گیرد. مطابق شکل 9 تبدیل کد باینری به کدگری می تواند با انتقال با اهمیت ترین بیت⁴ و استفاده از عملگر منطقی یای انحصاری⁵ میان سایر بیت ها انجام پذیرد.

ایده تولید الگوهای نورساختاریافته با کمک کد باینری اولین بار توسط پستدامر [24] مطرح گردید. مطابق شکل 10، در این شیوه هر تصویر معرف یک بیت از ایندکس های⁶ کدباینری متعلق به ستون های الگوی تابانده شده است. بدین ترتیب برای مثال ستون شماره 1024 (آخرین ستون متعلق به رزولوشن پروژکتور)، با کد انحصاری یازده بیتی "11000000000" قابل تشخیص خواهد بود [25].

4- انکود کردن اطلاعات در تصویر دو بعدی

ایده تعبیه اطلاعات سه بعدی (عمق تصویر) در یک تصویر دوبعدی ابتدا در تصاویر عمقی⁷ به کار گرفته شد. با پیشرفت و توسعه روش های فشرده سازی ابرنقاط، تکنیک هایی جهت تعبیه اطلاعات کامل سه بعدی (سه مولفه موقعیت نقاط و سایر اطلاعات ممکن نظیر نرمال سطح) در تصویر دوبعدی

جدول 3 سری کدهای معادل صحیح، دودویی، کدگری

Table 3 Decimal, Binary, Graycode equivalent codes

مقدار صحیح	کد دودویی	کد گری
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100

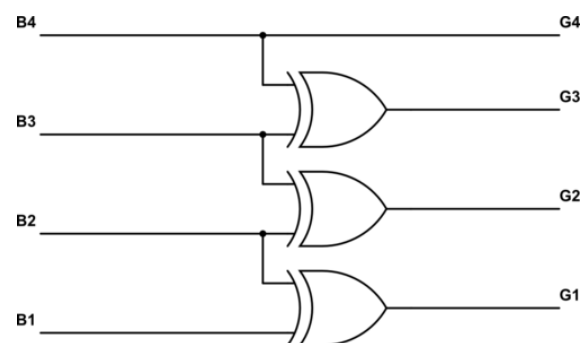


Fig. 9 Binary to Gray Code Conversion

شکل 9 الگوریتم تبدیل کد دودویی به کد گری

¹ Frank Gray

² Binary

³ Decimal

⁴ Most Significant Bit (Msb)

⁵ XoR

⁶ Indices

⁷ Depth map

جدول 4 مقایسه ویژگی‌های فرمت های تصویری رایج

Table 4 Compare the features of the most common image formats

نوع فایل	مزایا	معایب
JPEG	افت کیفیت تصویر در درجه امکان تعیین میزان فشرده سازی، حجم پایین تصویر	بالای فشرده سازی
GIF	حجم بالای فایل، تعداد محدود رنگ پوشش دهنده	نمایش تصاویر متحرک
BMP	حجم بالا و غیرفشرده گی	-
PNG	حجم بیشتر نسبت به JPEG کیفیت مناسب تصویر، امکان فشرده سازی غیراتلافی، پشتیبانی از کانال آلفا ⁹	و GIF
TIFF	حجم بالای فایل	کیفیت بسیار بالای تصویر

$$\text{نرخ فشرده سازی} = \frac{\text{اندازه فایل اصلی}}{\text{اندازه فایل فشرده}} \quad (13)$$

اما به اقتضای اهمیت داده های مربوط به ابرنقاط در کاربردهایی نظیر اندازه گیری، بکارگیری روش های اتلافی ناکارآمد است. همچنان که در تلاش ژانگ و همکاران [15]، نرخ فشرده سازی تکنیک هولوایمیج با استفاده از فرمت اتلافی Jpeg به نسبت [360:1] و برای فرمت غیراتلافی PNG به نسبت [70:1] دست یافت.

در این بخش با توجه به کم تعداد بودن مقادیر (شدت رنگ ها) بکاررفته و تک کاناله بودن تصویر بدست آمده (برخلاف سه کاناله بودن تکنیک هولوایمیج دلیل استفاده از روش انتقال فاز بخش 3-2)، برای نخستین بار پیشنهاد بکارگیری از الگوریتم فلیف¹⁰ [26] برای فشرده سازی ماتریس بدست آمده در بخش 4 به عنوان ابزاری جهت فشرده سازی ابرنقاط مطرح می شود.

6- نتایج تجربی

عملیات اسکن با قراردادن شیء در جلوی استند کالیبره شده و پروجکت کردن الگوهای تصویری کدگری بدست آمده از بخش 3 و تصویربرداری از آنها توسط دوربین مطابق شکل 13 انجام می پذیرد.

مطابق روش پیشنهادی، تصاویر الگوهای بدست آمده با یکدیگر تلفیق و با خوانش رشته کدهای گری و ایجاد تناظر یک به یک با مقادیر صحیح، الگوی شیب دار تک کاناله مقیاس خاکستری¹¹ بدست می آید (شکل 14).

سپس برای مستقل سازی داده ها، اطلاعات ضروری (کالیبراسیون) مورد نیاز در مرحله پردازش تصویر و عملیات مثلث بندی مطابق بخش 4 در تصویر تعبیه گردیده و ماتریس دوبعدی (تصویر) بدست آمده تحت فشرده سازی پایانی قرار می گیرد.

در جداول 5 تا 7 مقایسه نرخ فشرده سازی برای مدل ابرنقاط بازبایی شده از فایل فشرده برای سه قطعه آزمون تجربی و تصویر ابرنقاط بازبایی شده از فایل فشرده را نمایش می دهد (شکل های 15 و 16). مقایسه مدل ابرنقاط اولیه و ابرنقاط بازبایی شده از فایل فشرده نهایی، صحت و کاربردی بودن روش پیشنهادی را با بازبایی کامل اطلاعات بیان می نماید.

7- نتیجه گیری

در این مقاله روشی نو برای فشرده سازی ابرنقاط سه بعدی حاصل از عملیات اسکن در قالب یک تصویر دوبعدی با مزیت های تک کاناله بودن، غیراتلافی بودن روش، مستقل بودن از اطلاعات جانبی، نرخ فشرده سازی بالاتر و متمایز



Fig. 11 generating gradient grayscale image from merging of graycode images

شکل 11 تولید تصویر شیب دار خاکستری از تلفیق سری الگوهای کدگری

ضمائم اطلاعاتی ضروری در فرآیند مثلث بندی می باشد (نظیر مشخصات پیکربندی دستگاه اسکنر (نتایج کالیبراسیون)). بدین منظور، با تجزیه و تقسیم نمودن¹ اطلاعات مهم کالیبراسیون (بدست آمده در بخش 2-2-1 نظیر بردارهای انتقال و ماتریس های دوران و همچنین ماتریس ضرائب اصلاحی متعلق به سنسورها) به رشته های² عددی. این سری از اطلاعات را در منطقه ای از ماتریس تصویر که پیکسل های آن خالی از اطلاعات ابرنقاط باشد، کدگذاری و تعبیه می گردد (شکل 12).

بدین وسیله با مستقل نمودن فایل فشرده از سایر منابع در هنگام دیکود کردن، عملیات بازتولید اطلاعات کالیبراسیون از پیکسل های تصویر در مرحله نخست قرار خواهد گرفت.

5- فشرده سازی ماتریس دوبعدی

با تبدیل و ذخیره سازی ماتریس دو بعدی بدست آمده از بخش قبل در قالب یک تصویر دوبعدی، امکان بهره گیری از الگوریتم های توسعه یافته فشرده سازی تصاویر به عنوان ابزار اجرای مرحله دوم فشرده سازی ابرنقاط ممکن خواهد شد.

در زمینه پردازش سیگنال³، موضوع فشرده سازی دیتا یا کدینگ منبع⁴ و یا کاهش نرخ بیت⁵ شامل انکود کردن⁶ اطلاعات با استفاده از بیت های کمتر نسبت به دیتای اصلی می شود. بدین ترتیب روش های فشرده سازی داده بر اساس امکان بازبایی کامل اطلاعات اصلی از فایل فشرده به دو دسته اتلافی و غیراتلافی تقسیم بندی می شوند. فشرده سازی بدون اتلاف کاهش بیت ها را با تشخیص و رفع اضافات آماری⁷ انجام می دهد، در نتیجه هیچ اطلاعاتی در این نوع فشرده سازی از بین نمی رود. در روش های اتلافی، فشرده سازی با حذف دائمی برخی اطلاعات (خصوصاً اطلاعات تکراری⁸) صورت می پذیرد که در نتیجه آن دیگر امکان بازبایی کامل اطلاعات اولیه ممکن نخواهد بود [3].

در جدول 4 مشخصات برخی از فرمت های تصویری رایج ارائه شده است. بدیهی است با توجه به تعریف نرخ فشرده سازی بصورت نسبت میان اندازه داده غیرفشرده به اندازه داده فشرده رابطه (13)، دستیابی به نرخ های بالاتر طی روش های اتلافی ممکن خواهد بود.



Fig. 12 Encoding calibration results in image pixels

شکل 12 کدگذاری نتایج کالیبراسیون در پیکسل های تصویر

¹ Splitting

² Strings

³ Signal processing

⁴ Source coding

⁵ Bit-rate reduction

⁶ Encoding

⁷ Identifying and eliminating statistical redundancy

⁸ Redundant

⁹ Alpha-channel

¹⁰ Free lossless image format based on MANIAC compression

¹¹ Grayscale

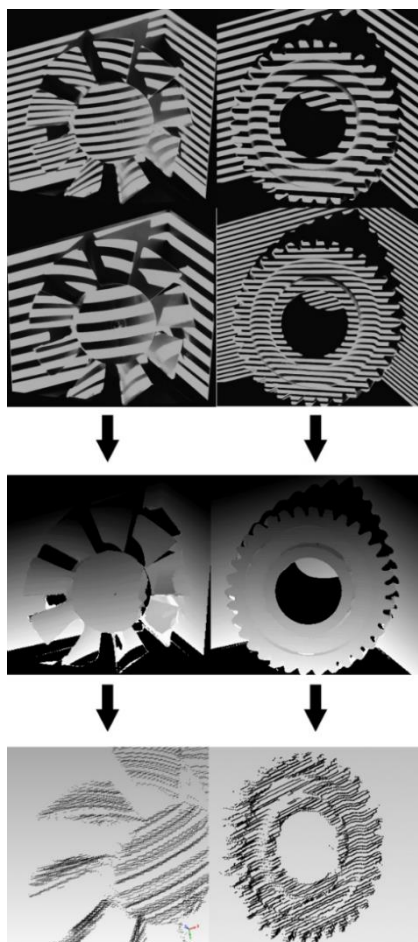


Fig. 16 Experimental process of proposed technique for compression and retrieval point cloud

شکل 16 نمونه تجربی اجرای روش پیشنهادی جهت فشرده سازی و بازیابی ابرنقاط از فایل فشرده

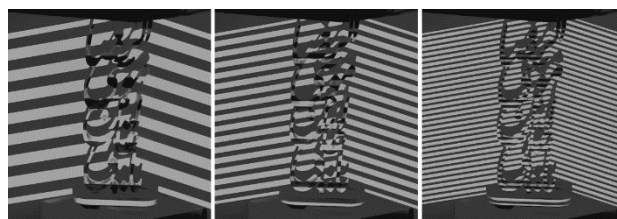


Fig. 13 projection of graycode series patterns on scanned object

شکل 13 تاباندن سری الگوهای کدگری بر سطح قطعه تحت اسکن



Fig. 14 Merging graycode series patterns

شکل 14 تلفیق تصاویر متعلق به سری الگوهای کدگری

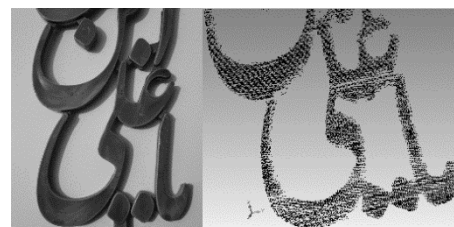


Fig. 15 Point Cloud generation from compressed file

شکل 15 تولید ابرنقاط از فایل فشرده

نسبت به سایر تکنیک های مشابه (مبتنی بر تصویر) ارائه گردید. بدیهی است ویژگی تک کاناله بودن تصویر، فرصت و ظرفیت استفاده از دو کانال دیگر

جدول 5 مقایسه نرخ فشرده سازی و حجم فایل نهایی با چندین فرمت رایج داده های سه بعدی برای قطعه آزمون اول

Table 5 Comparison of compression rate and compressed file size with some common 3d file formats for first test object

فایل فشرده نهایی با روش پیشنهادی	VTX (vertex)	OBJ	WRL	قطعه: تندیس (47319 نقطه)
8 کیلوبایت	1653 کیلوبایت	2104 کیلوبایت	1838 کیلوبایت	حجم فایل
	206.62:1	263:1	229.75:1	نرخ فشرده سازی

جدول 6 مقایسه نرخ فشرده سازی و حجم فایل نهایی با چندین فرمت رایج داده های سه بعدی برای قطعه آزمون دوم

Table 6 Comparison of compression rate and compressed file size with some common 3d file formats for second test object

فایل فشرده نهایی با روش پیشنهادی	VTX (vertex)	OBJ	WRL	قطعه: چرخ دنده (37849 نقطه)
9 کیلوبایت	1288 کیلوبایت	1647 کیلوبایت	1621 کیلوبایت	حجم فایل
	143:1	183:1	180:1	نرخ فشرده سازی

جدول 7 مقایسه نرخ فشرده سازی و حجم فایل نهایی با چندین فرمت رایج داده های سه بعدی برای قطعه آزمون سوم

Table 7 Comparison of compression rate and compressed file size with some common 3d file formats for third test object

فایل فشرده نهایی با روش پیشنهادی	VTX (vertex)	OBJ	WRL	قطعه: پره فن (30553 نقطه)
8.14 کیلوبایت	1040 کیلوبایت	1327 کیلوبایت	1159 کیلوبایت	حجم فایل
	127.7:1	163:1	142.38:1	نرخ فشرده سازی

تصویر RGB را برای تعبیه سایر اطلاعات ابرنقاط (نظیر بافت، نرمال سطح و غیره) ایجاد می‌نماید. طی پیاده‌سازی و اجرای تجربی روش پیشنهادی، صحت و کاربردی بودن آن با بازبایی 100 درصد اطلاعات اصلی و نرخ فشرده‌سازی [230:1] ثابت گردیده شد.

8- مراجع

- [1] Z. L. Faxin Yu, Hao Luo, Pinghui Wang, *Three-Dimensional Model Analysis and Processing*, pp. 17, Zhejiang University Press: Hangzhou and Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] C. Teutsch, *Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners*, pp. 15, Germany, Otto von Guericke University Magdeburg, S haker Verlag, 2007.
- [3] J. L. Dugelay, A. Baskurt, M. Daoudi, *3D Object Processing: Compression, Indexing and Watermarking*, pp. 45-46, Chichester, England, John Wiley & Sons, 2008.
- [4] Z. Hou, X. Su, Q. Zhang, Virtual structured-light coding for three-dimensional shape data compression, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 6, pp. 844-849, 2012.
- [5] N. Karpinsky, *3D geometry Compression with Holoimage*, PhD Thesis, Computer Engineering Department, Iowa State University, Ames, Iowa, 2011.
- [6] N. Karpinsky, S. Zhang, Composite phase-shifting algorithm for three-dimensional shape compression, *Optical Engineering*, Vol. 49, No. 6, pp. 063604-063604-6, 2010.
- [7] *100HSX Laser Scanners for Reverse Engineering*, Accessed on 23 July 2017; <http://www.surphaser.com/pdf/Surphaser%20100HSX.pdf>
- [8] C. Bräuer-Burchardt, A. Breitbarth, P. Kühmstedt, I. Schmidt, M. Heinze, G. Notni, Fringe projection based high speed 3D sensor for real-time measurements, *Proceeding of SPIE OPTICAL METROLOGY*, Munich: Germany, May 2011.
- [9] Y. Wang, L. Zhang, S. Yang, F. Ji, Two-channel high-accuracy Holoimage technique for three-dimensional data compression, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 85, pp. 48-52, 2016.
- [10] C. Gotsman, S. Gumhold, L. Kobbelt, Simplification and Compression of 3D Meshes, *Tutorials on Multiresolution in Geometric Modelling*, pp. 319-361, 2002.
- [11] P. Alliez, C. Gotsman, Recent advances in compression of 3D meshes, *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*, pp. 3-26, 2005.
- [12] R. Schnabel, R. Klein, Octree-based Point-Cloud Compression, *Proceedings of the 3rd Eurographics / IEEE VGTC conference on Point-Based Graphics*, Boston, Massachusetts, July 2006.
- [13] C. Zhang, D. Florencio, C. Loop, Point cloud attribute compression with graph transform, *IEEE International Conference on Image Processing*, Paris, France, pp. 2066-2070, 2014
- [14] I. Daribo, R. Furukawa, R. Sagawa, H. Kawasaki, Adaptive arithmetic coding for point cloud compression, *Proceeding of IEEE 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, Zurich, Switzerland, pp. 1-4, 2012
- [15] X. Gu, S. Zhang, P. Huang, L. Zhang, S. T. Yau, R. Martin, Holoimages, *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and physical modeling*, Cardiff, Wales, United Kingdom, pp. 129-138, June 2006
- [16] Y. Wang, L. Zhang, S. Yang, F. Ji, Two-channel high-accuracy Holoimage technique for three-dimensional data compression, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 85, pp. 48-52, 2016.
- [17] X. Gu, S. J. Gortler, H. Hoppe, Geometry images, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 21, No. 3, pp. 355-361, 2002.
- [18] S. Zhang, *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*, pp. 234-236, Florida, United States, CRC press Taylor & Francis Group, 2013.
- [19] Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [20] D. Lanman, G. Taubin, Build your own 3D scanner: optical triangulation for beginners, *Proceeding of ACM SIGGRAPH ASIA*, Yokohama, Japan, December 2009
- [21] I. Martynov, J. K. Kamarainen, L. Lensu, Projector calibration by inverse camera calibration, *Proceeding of Scandinavian Conference on Image Analysis*, Ystad, Sweden, May 2011
- [22] K. Harding, *Handbook of Optical Dimensional Metrology*, pp. 289, Florida, United States, CRC press Taylor&Francis, 2013.
- [23] T. Bell, S. Zhang, Multiwavelength depth encoding method for 3D range geometry compression, *Applied Optics*, Vol. 54, No. 36, pp. 10684-10691, 2015.
- [24] J. L. Posdamer, M. Altschuler, Surface measurement by space-encoded projected beam systems, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-17, 1982.
- [25] H. Rashidizad, A. Rahimi, Building Three-Dimensional scanner based on structured light technique using fringe projection pattern, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 035001, 2014.
- [26] J. Sneyers, P. Wuille, FLIF: Free lossless image format based on MANIAC compression, *Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing*, Phoenix, AZ, USA, Sept. 2016