

Utilização da técnica SLAM associada ao mapeamento por luz estruturada para registro e virtualização de interiores de patrimônios históricos

Use of the SLAM technique associated with structured light mapping for registration and virtualization of historical heritage interiors

Uso de la técnica SLAM asociada al mapeo por luz estructurada para el registro y virtualización de interiores del patrimonio histórico

Recebido: 23/07/2021 | Revisado: 29/07/2021 | Aceito: 30/07/2021 | Publicado: 05/08/2021

Pedro Henrique Sousa Marques Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3313-1309>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil

E-mail: pedrocutia@gmail.com

Fabio Luiz Albarici

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4436-0561>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil

E-mail: fabio.albarici@ifsuldeminas.edu.br

Henrique Candido de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2783-4668>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: hcandido@unicamp.br

João Carlos Brandão Reberte

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4365-9932>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil

E-mail: joaobreberte@hotmail.com

Resumo

A representação e documentação do patrimônio cultural e registro de edificações históricas, reconstrução ou reforma são de inestimável valor para manutenção da originalidade de tais estruturas. Atualmente, a solução adotada é a documentação 3D, utilizando-se da técnica de varredura a LASER, onde tem-se como principal vantagem a alta densidade de pontos e informações radiométricas. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia que aplica a técnica SLAM associada ao sistema de varredura por luz estruturada, que além de permitir o mapeamento interno de edificações históricas, possibilita a realização de tour virtual por todo o ambiente mapeado. O objetivo deste trabalho é realizar o mapeamento interno de uma igreja, verificar sua precisão e gerar um modelo 3D permitindo que o usuário interaja com o ambiente virtual e seja capaz de ter acesso online ao interior da igreja. Assim, o usuário poderá utilizar as ferramentas de medições e informações sobre as obras presentes na edificação. A fim de avaliar os resultados das feições mapeadas, fez-se testes numéricos que checam as medidas do mapeamento 3D com as medidas reais obtidas por um equipamento topográfico (estação total). Os resultados indicam que as análises realizadas apresentam uma discrepância máxima de 1,5 cm entre o mapeamento 3D via SLAM e o real. Dessa forma, pode-se afirmar que a metodologia aplicada é confiável e acurada para diversas áreas do conhecimento que se beneficiem de modelagem tridimensional e banco de dados para realizar tour virtual.

Palavras-chave: LASER; SLAM; Varredura por luz estruturada; Tour virtual.

Abstract

The representation and documentation of cultural heritage and registration of historic buildings, reconstruction or renovation are invaluable in maintaining the originality of such structures. Currently, the adopted solution is the 3D documentation, using the LASER scanning technique, where the main advantage is the high density of points and radiometric information. This work presents a methodology that applies the SLAM technique associated with the structured light scanning system, which, in addition to allowing the internal mapping of historic buildings, it enables the realization of a virtual tour throughout the mapped environment. The purpose of this work is to carry out the internal mapping of a church, verifying its accuracy and generating a 3D model - allowing the user to interact with the virtual environment and be able to have online access to the interior of the church. Thus, the user will be able to use the measurement tools and information about the works present in the building. In order to evaluate the results of the mapped features, numerical tests were performed that check the measurements of the 3D mapping with the real measurements obtained by a topographic equipment (total station). The results indicate that the analyzes performed show a maximum discrepancy of 1.5 cm between the 3D mapping via SLAM and the real one. Thus, it can be said

that the applied methodology is reliable and accurate for several knowledge areas that benefit from three-dimensional modeling and a database to perform a virtual tour.

Keywords: LASER; SLAM; Structured light scan; Virtual tour.

Resumen

La representación y documentación del patrimonio cultural y el registro de edificios históricos, la reconstrucción o renovación son invaluable para mantener la originalidad de tales estructuras. Actualmente, la solución adoptada es la documentación 3D, utilizando la técnica de escaneo LASER, donde la principal ventaja es la alta densidad de puntos e información radiométrica. Este trabajo presenta una metodología que aplica la técnica SLAM asociada al sistema de escaneo de luz estructurada, que además de permitir el mapeo interno de edificios históricos, posibilita la realización de un recorrido virtual por todo el entorno cartografiado. El propósito de este trabajo es realizar el mapeo interno de una iglesia, verificar su precisión y generar un modelo 3D que permita al usuario interactuar con el entorno virtual y poder tener acceso en línea al interior de la iglesia. Así, el usuario podrá utilizar las herramientas de medición y la información sobre las obras presentes en el edificio. Para evaluar los resultados de las características mapeadas, se realizaron pruebas numéricas que verifican las medidas del mapeo 3D con las medidas reales obtenidas por un equipo topográfico (estación total). Los resultados indican que los análisis realizados muestran una discrepancia máxima de 1,5 cm entre el mapeo 3D vía SLAM y el real. Así, se puede decir que la metodología aplicada es confiable y precisa, pudiendo ser aplicada en varias áreas del conocimiento que se benefician de un modelado tridimensional y una base de datos para realizar un recorrido virtual.

Palabras clave: LASER; SLAM; Escaneo de luz estructurada; Visita virtual.

1. Introdução

Com algumas tragédias recentes em locais históricos e de grande importância para a sociedade (vide incêndio no Museu Nacional do Brasil e Catedral de Notre-Dame na França), o registro histórico realizado com auxílio de geotecnologias ganhou espaço, por permitirem uma documentação confiável da estrutura das edificações, de obras presentes em seus interiores, assim como da possibilidade de realizar o *as built*, após reparos e obras de ampliação.

No início de 2020, com o avanço da pandemia ocasionada pela COVID-19, vários setores tiveram suas atividades rotineiras interrompidas, a exemplo dos museus e igrejas que contam com visitas sistemáticas de grande público, havendo assim um grande impacto econômico e cultural para a sociedade. Diante de tal cenário surge algumas perguntas: Como reduzir esses impactos sofridos pelas instituições que tem o turismo como principal fonte de renda? Como reproduzir, de forma fiel, o layout interno de um museu ou catedral para uma representação virtual? Ou ainda como possibilitar que mesmo com o isolamento social visitantes possam conhecer estes locais de forma remota?

Diante das demandas cada vez mais exigentes, novos equipamentos para aquisição de dados tridimensionais estão em pleno desenvolvimento, possibilitando a geração de dados cada vez mais precisos, rápidos e realistas. A técnica “localização e mapeamento simultâneos” (SLAM – *Simultaneous Localization And Mapping*) associada com a coleta de dados por luz estruturada tem se mostrado uma boa alternativa para atender as novas demandas do mercado.

A associação destas tecnologias visa a aquisição de dados para modelagem interna, gerando como resultado um mapeamento interno das edificações (ver Virtanen, et al., 2018; Pulcrano, et al., 2019; Shults, et al., 2019; Sulaiman, et al., 2020; Dezen-Kempter, et al., 2015; Rodrigues & Agostinho, 2020).

Os modelos 3D têm se tornado cada vez mais relevantes no âmbito das mais diversas áreas que necessitam de geração, documentação e gestão de dados precisos como: Arquitetura (Rebelo, 1999), Turismo (Taufer & Ferreira, 2019), Engenharias (Piazzetta, et al., 2017) e Arqueologia (Petriaggi & Ayala, 2015). Além disso, a demanda por modelos digitais 3D de baixo custo e gerados com rapidez vem crescendo rapidamente para atender aplicações como: construção, navegação interna, gestão e desenvolvimento imobiliário, serviços de emergência e mapeamento de obras subterrâneas com uma acurácia à nível centimétrico.

Atualmente a maioria dos equipamentos utilizados para o mapeamento interno utilizam sensores fotográficos como câmeras digitais, câmeras de profundidade e sistemas de varredura com base em “Amplificação de Luz por Emissão

Estimulada de Radiação” (LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Esse último, utilizado quando se necessita de boa precisão e um alto nível de detalhamento, principalmente por meio de coleta estática à nível terrestre - Sistemas de Varredura à LASER Terrestres (SVLT). Os SVLT se baseiam na emissão estimulada de luz em comprimento de onda específico e na capacidade de realizar medidas de distâncias e ângulos de forma automática e com alta frequência por meio de sistema de varredura óptico-mecânico (Wei, et al., 2010; Kadobayashi, et al., 2004; Simonelli, et al., 2020).

Entretanto, a associação entre duas técnicas de mapeamento apresenta um grande potencial para o registro de patrimônios são elas: o SLAM e a Varredura por Luz Estruturada. A primeira técnica, foi originalmente desenvolvida por (Leonard & Durrant-Whyte, 1991), e utiliza-se de um algoritmo capaz de localizar o equipamento em meio ao local de mapeamento sem a necessidade de pontos de controle, além de gerar informações 3D do ambiente. A segunda técnica tem como princípio a emissão de padrões luminosos sobre os alvos, com o objetivo de identificar anomalias e a partir disso realizar cálculos de profundidade, sendo capaz de mapear com precisão o ambiente em que se encontra (Reiss, 2007).

A união entre a técnica SLAM e o sistema de varredura por luz estruturada, possibilita incluir dados de câmeras digitais aos modelos – possibilidade essa de notória aplicabilidade para projetos de realidade aumentada e tour virtual. A técnica ainda permite a obtenção medidas redundantes relacionadas à imagem, o que possibilita a criação de uma densa nuvem de pontos, a qual além de representar de forma fidedigna o local mapeado, oferece também, a oportunidade de extrair informações (medidas) acuradas sobre as feições de interesse, o que é de extrema importância quando se pretende trabalhar com a mensuração de objetos (alturas, comprimentos, profundidades ou áreas presentes na cena).

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é realizar o registro interno da igreja de São Geraldo Magela, na cidade de Inconfidentes-MG, gerando um modelo 3D acurado capaz de ser utilizado para tour virtual, onde o usuário poderá ter acesso online ao interior da igreja, tal modelo ainda possibilita que arquitetos e profissionais que trabalham com reconstrução obtenham medidas precisas sobre as feições presentes na cena. Assim, tem-se três abordagens para o usuário: acessibilidade, informações detalhadas sobre o interior e experiência visual.

Como forma de avaliar a qualidade e potencial desta documentação em 3D para fins arquitetônicos (reformas e/ou restauração), realizou-se a medição de objetos de interesse no modelo 3D e comparou-se com suas dimensões reais obtidas in loco utilizando uma estação total de alta precisão. Diante do exposto, trata-se de uma pesquisa de campo, com finalidade aplicada onde apresenta-se uma abordagem quantitativa (Fontelles, et al., 2009).

2. Corpo Teórico

O termo tour virtual pode ser descrito como uma simulação de um local existente, gerado por meio de uma interligação de imagens 360° visualizadas de forma ininterrupta. É um método imersivo que aloca os usuários dentro do ambiente mapeado, permitindo uma melhor consciência situacional, oferecendo um alto nível de funcionalidade para visualização, possibilitando ainda uma análise de dados virtuais (Osman, et al., 2009). O objetivo dessa tecnologia é proporcionar aos usuários a sensação de estar presente fisicamente em um determinado local, proporcionando assim a sensação de realidade de espaço, possibilitando navegações virtuais de paisagens que existem no mundo real (Li, et al., 1999).

Outra forma, de interação com o usuário bastante utilizada é a realidade aumentada, onde possibilita estabelecer-se uma conexão de elementos virtuais no ambiente real (Milgram, et al., 1995). Ou ainda, pode ser entendido como um sistema que suplementa o mundo real com objetos virtuais gerados por computador, criando a sensação de coexistir no mesmo espaço, a tecnologia combina objetos reais e virtuais no ambiente real, tal processo é executado interativamente em tempo real (Azuma, et al., 2001).

Nas duas técnicas de representação de ambiente descritas, a interação entre usuário e cena é realizada por meio de dispositivos como computadores e *smartphones*.

Entretanto, outras maneiras de se obter uma modelagem 3D do interior das edificações, se baseiam na tecnologia LASER e na “Detecção de luz e mensuração de distâncias” (LiDAR - *Light Detection And Ranging*), embarcadas nos SVLT, que fornecem informações tridimensionais do ambiente mapeado (Shan & Toth, 2008).

Apesar do resultado da varredura ser uma densa nuvem de pontos que descreve com precisão milimétrica a cena mapeada, podemos citar algumas desvantagens, como a limitação de movimento que este tipo de equipamento possui, tal fato gera como consequência oclusões causadas pelos objetos presentes na cena, problema este que pode ser solucionado realizando varredura de diferentes pontos de vista, contudo delonga de forma significativa o tempo de realização do trabalho – levantamento e processamento (Wutke, 2006), e conseqüentemente o seu custo.

A necessidade de uso de pontos de controle na coleta de dados é um problema que foi mitigado com os “Sistemas de mapeamento móvel interno” (IMMS - *Indoor Mobile Mapping Systems*), sistemas estes relativamente novos que são viáveis para a aquisição de nuvens de pontos de alta resolução enquanto se movimenta com a plataforma (levantamento cinemático), sem o uso de alvos e pontos de controle, aumentando assim a produtividade. Em outras palavras, um IMMS é um sistema multisensor em movimento que mapeia o ambiente de forma cinemática sem o uso de apoio externo (Kajaluoto, et al., 2015).

Do ponto de vista geométrico, os IMMS são semelhantes aos sistemas terrestres de mapeamento móvel (STMM) concebidos para cadastros de estradas. A revolução introduzida pelo STMM foi a orientação direta dos sensores de imagem por meio de sistema de navegação, evitando assim o método indireto clássico que se baseava em pontos de controle obtidos por levantamentos topográficos convencionais.

O IMMS difere do STMM na forma como a navegação é realizada. Como são sempre para uso interno, não podem se basear em posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Dessa forma, é necessário considerar a tarefa de navegação instantânea de uma maneira diferente. Os métodos analíticos usados para resolver este problema pertencem à classe dos chamados algoritmos SLAM, originalmente desenvolvidos para aplicações em robótica (Cadena, et al., 2016).

A técnica de mapeamento SLAM foi originalmente desenvolvida por Leonard e Durrant-Whyte (1991), com o objetivo inicial de ser aplicado na navegação de robôs autônomos, os quais utilizavam o mapeamento em tempo real do ambiente para calcular sua posição na cena mapeada e a partir daí se locomover no ambiente, desviando dos obstáculos.

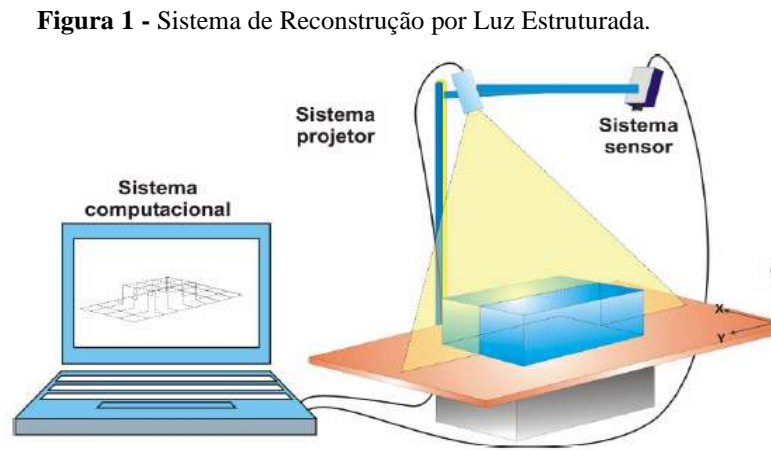
Com essa técnica é possível construir um mapa e, simultaneamente, localizar o sensor dentro do mapa em tempo real ou quase real. A integração desses diversos parâmetros é mais frequentemente realizada com apoio de algoritmos relacionados ao SLAM. Especificamente, os filtros de Kalman são mais usados rotineiramente, dentre eles os mais populares são o filtro de Kalman estendido (EKF) e os filtros de partículas Rao-Blackwellized (RBPF) (Carlone, et al., 2011).

A técnica SLAM opera da seguinte maneira, a partir da primeira varredura da cena é obtido uma densa nuvem de pontos que visa representar de forma fidedigna os objetos mais marcantes de superfície - *Surfels* (Piniotis, et al., 2020). Em seguida com o equipamento em outra posição (após deslocamento), a operação é repetida. Os dois conjuntos de *Surfels* (obtidos inicialmente e após deslocamento) são utilizados para registrar as nuvens de pontos obtidas de locais distintos e ajustar a posição do equipamento.

O SLAM normalmente funciona bem em ambientes com a presença abundante de objetos com superfícies bem definidas, como cantos de móveis, contornos de portas e padrões heterogêneos. No entanto, a maioria dos algoritmos pode ter dificuldades em ambientes abertos, com padrões homogêneos e repetitivos (Piniotis, et al., 2020).

Os algoritmos SLAM implementados em vários sistemas são baseados nos mesmos conceitos fundamentais, contudo há certas modificações dependendo da tecnologia utilizada para o mapeamento da cena. O sistema SLAM pode usar vários tipos de sensores para realizar o mapeamento completo da uma cena como sonares, câmaras e sistemas de varredura à LASER (Santana, 2011). Outra maneira de se obter o mapeamento completo de um determinado ambiente é através da reconstrução tridimensional por luz estruturada.

Na reconstrução tridimensional por luz estruturada, padrões luminosos são projetados sobre a superfície do objeto e um instrumento sensor captura a imagem dos padrões que são distorcidos devido ao relevo da superfície de projeção (Reiss, 2007). Através das distorções da luz estruturada oriundas das superfícies do objeto é possível gerar um mapeamento tridimensional da área de interesse. A Figura 1 ilustra o processo de mapeamento.



Fonte: Reiss (2007).

O sistema projetor (Figura 1) é composto por uma fonte de luz (visível ou não) emitido de forma modulada que é encapsulada em um receptáculo para que a projeção seja dada em uma direção controlada (Reiss, 2007; Rocchini, et al., 2001). O sistema computacional por sua vez recebe as distorções oriundas da superfície mapeada (captada pelo sistema sensor) e realiza a transformação das informações coletadas em uma nuvem de pontos tridimensional através de um algoritmo.

O sistema computacional controla todos os sensores. A maioria dos algoritmos que transformam as informações em nuvens de pontos, utilizam os princípios da triangulação para obter as coordenadas tridimensionais dos pontos que constituem o modelo 3D dos objetos mapeados (Geng, 2011; Rocchini, et al., 2001).

Segundo Geng (2011), se a cena é totalmente plana, o padrão mostrado na imagem adquirida é semelhante à da luz estruturada projetada. No entanto, quando a superfície da cena não é plana, a forma geométrica da superfície distorce a luz estruturada projetada.

Dessa forma neste trabalho utilizou-se a tecnologia SLAM por meio da coleta de informações via Varredura por Luz Estruturada que segundo (Shults, et al., 2019; Pulcrano, et al., 2019) vem apresentando bons resultados no que diz respeito a geração de tour virtual e a digitalização de interiores das edificações.

3. Materiais e Método

Neste trabalho o equipamento que permite a aplicação da técnica SLAM associada ao mapeamento por luz estruturada a ser utilizado é a Câmera Matterport, a qual realiza a digitalização de interiores tomando como base imagens RGB (Endres, et al., 2012).

Tal câmera já vem sendo citada como uma alternativa para driblar o grande impacto econômico e social que a pandemia da COVID-19 vem causando às instituições que tem como principal fonte de renda as visitas turísticas (El-Said & Aziz 2021).

A câmera é formada por três conjuntos de lentes, como destacado na Figura 2. Cada conjunto de lentes conta com os seguintes sensores, uma câmera fotográfica (para que o mapeamento tenha informações radiométricas), uma câmera

infravermelha de imagem térmica, e uma câmera de profundidade responsável por capturar dados tridimensionais em “alto alcance dinâmico” (HDR - *High Dynamic Range*), tal tecnologia tem o objetivo de captar uma faixa maior de luminância, o que possibilita uma melhor visualização dos objetos presentes na cena mesmo haja uma variação grande de luminosidade no ambiente.

A câmera de profundidade possibilita a captura e visualização de objetos dispostos em planos diferentes (próximo ou longe do sensor) sem que haja desfoque na representação dos objetos, tal fato associado ao alto alcance dinâmico possibilita ao usuário observar melhor tonalidades claras e escuras dos objetos, gerando um resultado realista.

Após a captura dos dados realiza-se um processamento geral que tem como finalidade a união das informações obtidas pelos diversos sensores, e por fim é gerado uma nuvem de pontos 3D (Piniotis, et al., 2020).

A mesma após passar por um processamento possibilita a criação de um tour virtual, onde de maneira imersiva aloca os usuários dentro do ambiente. O que possibilita os espectadores observar de forma mais real os detalhes do ambiente.

O tour virtual gerado estabelece uma conexão entre os elementos virtuais e reais, onde uma sensação de coexistir no mesmo espaço é criada nas pessoas que observam o resultado do trabalho. Conforme destacado por Milgram et al. (1995) essa relação entre observadores e ambiente pode ser chamada de realidade aumentada.

Figura 2 – A câmera Matterpot.



Fonte: Matterpot (2019).

Na Figura 2 percebe-se que as câmeras são orientadas horizontalmente e levemente inclinadas para cima e para baixo, de forma que os três centros de projeção convirjam em um único ponto. O campo de visão vertical da câmera é limitado a 300°, excluindo uma porção da parte superior e inferior da imagem, tal fato ocorre devido a posição das câmeras, já no sentido horizontal, devido a rotação do equipamento em torno do seu próprio eixo, os dados são captados em um ângulo de 360° (Pulcrano, et al., 2019).

O sistema de aquisição de imagens do equipamento usa um sensor 3D de luz estruturada (infravermelho) o qual possui um tempo de captura igual a 20 segundos por panorama e uma distância máxima de operação de 4,5 m (Shults, et al., 2019). A cena gerada pelo equipamento é o resultado da união de 18 imagens retangulares (1280x1024 pixels) capturadas pelas câmeras do dispositivo.

Vale ressaltar que a capacidade de captura da câmera RGB sofre alteração conforme a ondulação da lente, o sensor tem a capacidade de captura de 3.600 pontos na região central da lente e 1.800 pontos nas extremidades. Em cada panorama completo há aproximadamente 4 milhões de pontos (Shults, et al., 2019).

Todo o sistema é gerenciado por meio de dispositivos móveis, com *IOS App for Matterport Capture*, permitindo controlar a câmera através de uma conexão *WI-FI* entre os dispositivos. Para cada ponto de estação do instrumento, este

aplicativo exibe um primeiro processamento do plano que permite verificar continuamente as áreas adquiridas, suas respectivas varreduras e possíveis oclusões. Infelizmente, essa visualização de dados em tempo real limita-se apenas à planimetria, embora um operador experiente seja capaz de identificar áreas de sombra com antecedência, nem sempre é possível verificar *in loco* a qualidade de uma aquisição.

Durante o processo de aquisição de dados, não há a necessidade de destacar os alvos de referência, e nem a necessidade da câmera estar completamente nivelada sobre o tripé pois o equipamento devido ao fato de utilizar o SLAM resolve os parâmetros de rotação relativa ao referenciar as cenas alinhando os dados de duas posições consecutivas com base em pontos homólogos da cena. O algoritmo de alinhamento, utiliza dos elementos das imagens para obter os dados espaciais (posição) dos elementos presentes na cena, em seguida, através de uma associação entre as posições que os objetos ocupam na cena, realiza-se a reconstituição de toda a área sem a necessidade de pontos de controle (Piniotis, et al., 2020).

A tecnologia SLAM embarcada na Matterport pode ser afetada por grandes variações nas condições de iluminação e pelo deslocamento dos objetos dentro da cena, como também destacado por Pulcrano, et al. (2019).

Uma vez que o algoritmo responsável por unir as cenas se baseia em pontos homólogos para formar o modelo 3D, mudanças bruscas nos padrões das imagens capturadas podem gerar resíduos na cena, contribuindo-se assim para uma interpretação incorreta do algoritmo, o qual produz um resultado inexato.

O ideal quando se trabalha com este tipo de tecnologia é controlar ao máximo a variação da iluminação e evitar a movimentação de objetos e de pessoas nos instantes que o equipamento realiza a aquisição dos dados. Um segundo equipamento utilizado neste trabalho foi a estação total, a qual foi usada para medir determinados objetos presentes na cena afim de posteriormente comparar com as dimensões obtidas no produto 3D gerado, permitindo assim, avaliar a qualidade das medidas extraídas pelo método proposto.

4. Resultados e Discussão

O local escolhido para aplicar o método de mapeamento SLAM associada ao mapeamento por luz estruturada foi o interior da Igreja matriz de São Geraldo Magela, localizada na praça central da cidade de Inconfidentes-MG, o trabalho foi realizado durante o dia com as portas da igreja fechadas, tal medida foi tomada a fim de garantir que a qualidade das imagens não fosse afetada com a alta iluminação externa que, segundo Pulcrano et al. (2019), pode influenciar notavelmente no correto funcionamento dos sensores, o fato de as portas estarem fechadas contribuiu também para a redução de visitantes transitando pelo local, o que também poderia atrapalhar o processo de mapeamento.

Após a escolha do local de início, o aparelho é instalado sobre um tripé e leva aproximadamente 20 segundos para a captura da cena, ao todo foram necessárias 142 cenas para mapear toda a parte interna da matriz. Visando uma melhor qualidade na união das cenas, as mesmas foram tomadas a uma distância de aproximadamente 2,5m entre si, de forma que houvesse um alto nível de pontos homólogos entre elas (alta sobreposição), garantindo assim uma boa união entre as cenas levantadas de forma consecutiva. Vale ressaltar que, no momento da tomada das cenas o equipamento não necessitar estar completamente nivelado, pois o SLAM é capaz de resolver os parâmetros de rota

O processo de mapeamento foi assistido pelo *Tablet*, visando identificar oclusões em locais com pouca iluminação, caso isso acontecesse seria necessário realizar cenas próximas, a fim de garantir uma boa qualidade do produto. A Figura 3 ilustra o processo de levantamento de campo, bem como o modo de operação e controle do equipamento.

Figura 3 – Levantamento de Campo.

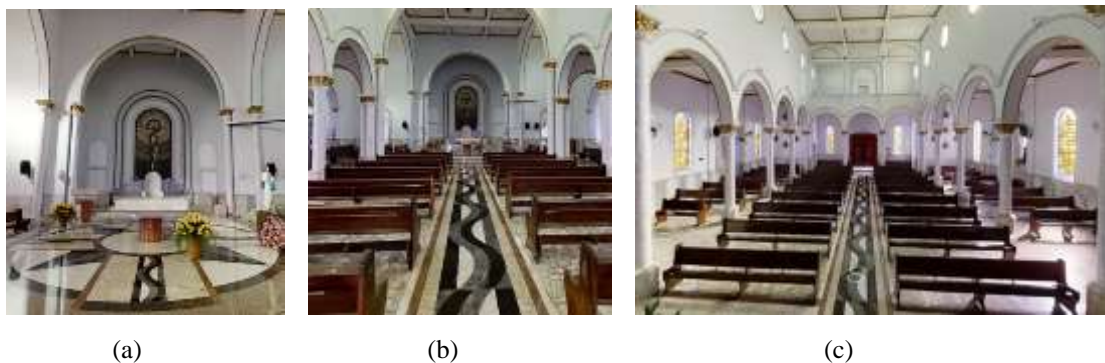


Fonte: Autores.

O tour virtual é gerado de forma automática pelo *software* de mapeamento, para tal basta apenas realizar o upload das informações na plataforma web do equipamento, onde gera-se um link para acessar o resultado do mapeamento.

Quando o usuário acessa o resultado (modelo 3D) através do link disponibilizado (<https://my.matterport.com/show/?m=JEU4K3Rjo3H>), o mesmo imerge na cena a qual é exibida de forma simples e interativa pela plataforma web, a apresentação do tour virtual proporciona aos espectadores uma experiência praticamente real. A Figura 4 é o resultado do modelo.

Figura 4 – Resultados do Mapeamento: (a) Altar, (b) Corredor principal visto do fundo e (c) Corredor principal visto do altar.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autores.

Na Figura 4, é apresentada uma visão geral do produto gerado pelo processamento, nota-se nas imagens capturadas do tour virtual a riqueza de detalhes bem como a nitidez, tal fato permite que restauradores através de uma análise mais apurada possa identificar os materiais utilizados na construção das peças, bem como a tonalidade original do artefato observado, além de que em uma obra de restauração tal produto pode servir como base em situações cujo acesso ao patrimônio não é mais possível (devido a terremotos, incêndios, colapso de estrutura, etc.), possibilitando assim executar um projeto de restauração o mais fidedigno possível ao original.

Associado às imagens, tem-se informações detalhadas em banco de dados sobre os artefatos, quadros e imagens sacras, que são a chave para entreter o usuário - tornando a experiência não apenas visual, mas também interativa. O detalhamento das informações pode ser realizado através de medições, rotulagem do espaço, objeto ou visualização da planta de localização. A Figura 5 ilustra estas informações.

Figura 5 – Resultados do Mapeamento: (a) Planta Baixa com Localização das obras, (b) Ponto visual para usuário e (c) Imagem sacra com rotulagem.



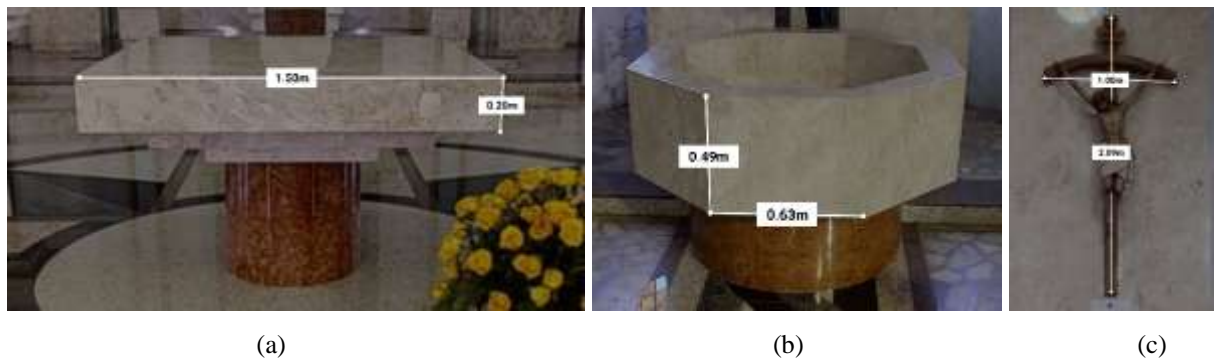
Fonte: Autores.

Nota-se na Figura 5 (a) a localização da Imagem de Jesus Cristo e da Fonte de Batismo, quando o usuário clicar sobre o local, será imediatamente levado ao local específico, outra forma de interação é quando o usuário está navegando pela cena e um rótulo azul (b) chama a atenção do usuário indicando que naquele local existe informações disponíveis para serem consultadas. Ao acessar esta informação (c) o usuário se conectará ao banco de dados interno, onde será apresentada as informações do objeto de interesse. Estas interações proporcionam ao usuário uma imersão na cena promovendo uma experiência visual, onde tem-se a sensação de estar presente no local.

O usuário poderá também utilizar-se de medições quando estiver fazendo o tour virtual, ou se o usuário for um arquiteto ou engenheiro que estiver realizando reforma, restaurações ou ainda apresentação de algum imóvel, que necessitem de medidas confiáveis.

Visando avaliar a precisão métrica fornecida pelo equipamento fez-se medições como largura, espessura, altura e comprimento de três feições disponíveis no interior da igreja, tais objetos foram Mesa do Altar, Imagem de Jesus Cristo e Fonte de batismo. As medidas foram tomadas sobre o resultado do tour virtual e com a estação total (referência). As Figura 6 apresenta as medidas tomadas sobre o resultado da câmera.

Figura 6 – Medidas obtidas com o Matterport: (a) Mesa do Altar, (b) Fonte de Batismo e (c) Imagem de Jesus Cristo.



Fonte: Autores.

Para avaliarmos o resultado gerado pela câmera, a Tabela 1 mostra a comparação dos valores medidos com os dois equipamentos.

Tabela 1 – Medições Comparativas.

Objeto	Dimensão	Matterport (m)	Estação Total (m)	Discrepância (mm)
Mesa do Altar (Fig. 5a)	Largura do Tampo	1,500	1,490	1,0
	Espessura do Tampo	0,200	0,199	1,0
Fonte de Batismo (Fig. 5b)	Comprimento do Sextavado	0,630	0,615	15,0
	Altura do Sextavado	0,490	0,492	-2,0
Imagem de Jesus Cristo (Fig. 5c)	Altura da Cruz	2,09	2,085	5,0
	Largura da Cruz	1,00	0,986	14,0

Fonte: Autores.

Nota-se que há uma pequena diferença entre os valores de medidas obtidos com cada um dos equipamentos, parte dessas discrepâncias podem ser atribuídas ao erro de pontaria, cometido no ato da seleção de pontos no *software*, visto que a seleção de pontos não é idêntica a posição exata da medida obtida com a estação total, fato comum em representações tridimensionais baseada em nuvem de pontos 3D. O teste numérico foi realizado nas feições apresentadas, de modo a validar as potencialidades de mensuração para diversas finalidades.

Porém, mesmo com o erro de pontaria, as discrepâncias podem ser consideradas pequenas e que atendem a muitas aplicações nas áreas de Engenharia, Arquitetura como por exemplo a documentação de obras sacras, além de mostrar a potencialidade da câmera em virtualização de interiores.

Um diferencial do procedimento utilizado neste trabalho (SLAM) em comparação com os SVLT é o tempo de mapeamento e a quantidade de oclusões, para a realização deste trabalho a câmera levou aproximadamente 2 horas para ocupar as 142 poses, para mapear o mesmo local com um SVLT o tempo de mapeamento gira em torno de 4 horas capturado apenas 6 poses.

Contudo o grande diferencial da câmera é a baixa quantidade de oclusões quando comparada com os SVLT, tal fato ocorre devido a facilidade em ocupar um número expressivamente maior de poses para coleta de dados.

5. Conclusão

Com o vertiginoso crescimento de plataformas digitais *online* e devido às restrições ocasionadas pela pandemia, muitas estratégias estão sendo desenvolvidas e cada vez mais os profissionais demandam formas eficazes de se obter informação fidedigna e em tempo real.

Dessa forma, o experimento aqui desenvolvido mostra potencialidades para as mais diversas áreas do conhecimento (Arquitetura e Engenharias), além de realizar uma “viagem virtual” a museus, igrejas e locais turísticos.

Por se tratar de um modelo que agrega grande quantidade de informações fidedignas, além do fato de que o processamento e divulgação dos resultados ser feita de forma simples, a técnica SLAM e o equipamento aqui utilizado, se mostrou viável para a representação detalhada de interiores de edificações, proporcionando ao usuário as abordagens necessárias (acessibilidade, informações detalhadas sobre as obras e experiência visual) para que o tour virtual seja atraente e dinâmico.

Com uma interface simples e didática o resultado do processamento é apresentado e proporciona ao usuário a liberdade de mensurar objetos e feições, além de possibilitar a identificação dos materiais que constituem os objetos presentes na cena.

A Tabela 1 apresenta algumas medidas comparativas entre a técnica de mapeamento proposta e as medias comparativas realizada in loco, onde visualiza-se que o erro máximo obtido na medida foi de 1,5 cm. Dessa forma avalia-se que o tour virtual possui potencialidade de ser empregado em diversas áreas, e utilizado em diversas aplicações.

Contudo a técnica de mapeamento sugerida apresenta certos aspectos negativos quando comparada com o método de mapeamento por SVLT. Os sensores da câmera sofrem sérias interferências devido as alterações de luminosidade do ambiente e as movimentações dos objetos na cena. Fatores estes que impossibilitam a utilização da câmera em ambientes aberto, e em locais com movimentações de pessoas. Tais fatores não afetam os SVLT a ponto de impossibilitar o mapeamento utilizando esta técnica. Como proposta de trabalhos futuros sugere-se estudar e avaliar métodos que possibilitem a utilização do SLAM e o equipamento utilizado para mapear ambientes externos a fim de gerar um layout completo das edificações históricas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Guandalini Equipamentos Topográficos e Comércio pela prontidão ao empréstimo da Câmera Matterport utilizada, agradecem também ao IFSULDEMINAS Campus Inconfidentes pelo empréstimo da estação total, e a paróquia São Geraldo Magela por ceder o espaço utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & Macintyre, B. (2021). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics And Applications*, 21(6), 34-47. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/38.963459>.
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D. Neira, J., Reid, I. & Leonard, J.J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Trans. on Robotics*, 32(6), 1309-1332.
- Carlone, L., Kaouk Ng, M., Du, J., Bona, B. & Indri, M. (2011). Simultaneous Localization and Mapping Using Rao-Blackwellized Particle Filters in *Multi Robot Systems. J Intell Robot Syst*, 63, 283-207. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-010-9457-0>.
- Dezen-Kempter, E., Soibelman, L., Chen, M. & Müller Filho, A. V. (2015). Escaneamento 3D a Laser, Fotogrametria e Modelagem da Informação da Construção para Gestão e Operação de Edificações Históricas. *Gestão & Tecnologia De Projetos*, 10(2), 113-124. <https://doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>.
- El-Said, O. & Aziz, H. (2021). Virtual Tours a Means to an End: An Analysis of Virtual Tours' Role in Tourism Recovery Post COVID-19. *Journal of Travel Research*. <https://doi.org/10.1177/0047287521997567>.
- Endres, F., Hess, J., Engelhard, N., Sturm, J., Cremers, D. & Burgard, W. (2012). An Evaluation of the RGB-D SLAM system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1691-1696. <http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225199>.

- Fontelles, M.J., Simões, M.G., Farias, S.H., & Fontelles, R.G.S. (2009). Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. *Revista Paraense de Medicina*, 23(3), 1-8.
- Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*, 3, 128-160. <http://dx.doi.org/10.1364/aop.3.000128>.
- Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H. & Furukawa, R., (2004). Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf.* 35(5), 401-406.
- Kaijaluo, R., Kukko, A. & Hyypää, J. (2015). Precise indoor localization for mobile laser scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1-6.
- Li, T-Y., Lien, J-M., Chiu, S-Y. & Yu, T-H. (1999). Automatically generating virtual guided tours. *Proceedings Computer Animation*, 99-106, <http://dx.doi.org/10.1109/CA.1999.781203>.
- Leonard, J.J. & Durrant-Whyte, H.F. (1991). Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 7(3), 376-382. <http://dx.doi.org/10.1109/70.88147>.
- Matterport, (2019). *Matterport Pro 3D Camera specifications*. <https://matterport.com/pro2-3d-camera>.
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. & Kishino, F. (1995) Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. *Telem manipulator And Telepresence Technologies*, 282-292. <http://dx.doi.org/10.1117/12.197321>.
- Osman, A., Baharin, H., Ismail, M. & Jusoff, K. (2009). Paper prototyping as a rapid participatory design technique. *Computer and Information Science* 2(3), 173-182. <http://dx.doi.org/10.5539/cis.v2n3p53>.
- Petriaggi, B. Davide. & Ayala, G. G. (2015). Laser scanner reliefs of selected archeological structures in the submerged baiae. *Isprs - International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 5(5), 79-83. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-5-w5-79-2015>.
- Piazzetta, G. R., Trzaskos, B. & Machado, Álvaro M. L. (2017). Aplicação do laser scanner na análise de estabilidade em escavações subterrâneas: Mina Tabiporã, Campo Largo, PR. *Geologia USP. Série Científica*, 17(2), 59-70. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-266>.
- Piniotis, G., Soile, S., Bourexis, F., Tsakiri, M. & Ioannidis, C. (2020). Experimental assessment of 3d narrow space mapping technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 149-156. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-149-2020>.
- Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G. & di Luggo, A. (2019). 3D cameras acquisitions for the documentation of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 639-646. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-639-2019>.
- Rebelo, I. B. (1999). *Realidade virtual aplicada à arquitetura e urbanismo: representação, simulação e avaliação de projetos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/80518>.
- Reiss, M. L. L. (2007). *Reconstrução tridimensional digital de objetos à curta distância por meio de luz estruturada*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10072>.
- Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P. & Scopigno R. (2001). A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, 20(3). <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>.
- Rodrigues, R. L., & Agostinho, C. J. (2020). Documentação digital do patrimônio arquitetônico: a igreja Nossa Senhora Mãe dos Homens - Coqueiro Seco/AL. *Gestão & Tecnologia De Projetos*, 15(1), 26-41. <https://doi.org/10.11606/gtp.v15i1.152125>.
- Santana, A. M. (2011). *Localização e mapeamento simultâneos de ambientes planos usando visão monocular e representação híbrida do ambiente*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15150>.
- Simões, M. G., Farias, S. H. & Fontelles, R.G.S. (2009). Metodologia da pesquisa científica: Diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa. *Revista Paraense de medicina*. 23(3), 1-8. Disponível: <http://www.files.bvs.br/uploads/s/0101-5907/2009/v23n3/a/967.pdf>.
- Simonelli, L., Amorim, A. L. de. & Groetelaars, N. J. (2020). Documentação da volumetria de edificações históricas através de nuvens de pontos: um experimento no Pelourinho, em Salvador na Bahia. *Research, Society and Development*, 9(2), e174922268. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.2268>.
- Sulaiman, M. Z., Aziz, M. N. A., Bakar, M. H. A., Halili, N. A. & Azuddin, M. A. (2020). Matterport: virtual tour as a new marketing approach in real estate business during pandemic COVID-19. *Atlantis Press*. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.201202.079>.
- Shan, J. & Toth, C. (2008). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. <https://doi.org/10.1201/9781420051438>
- Shults, R., Levin, E., Habibi, R., Shenoy, S., Honcheruk, O., Hart, T. & An, Z. (2019). Capability of matterport 3D camera for industrial archaeology sites inventory. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-2-W11-1059-2019>.
- Taufer, L. & Ferreira, L. T. (2019, out-dez). Realidade Virtual no Turismo: Entretenimento ou uma mudança de paradigma? *Rosa dos Ventos – Turismo e Hospitalidade*, 11(4), 908-921. <http://dx.doi.org/10.18226/21789061.v11i4p908>.
- Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Turppa, T., Vaaja, M.T., Julin, A., Kukko, A., Hyypää, J., Ahlavo, M., von Numer, J.E., Haggren, H. & Hyypää, H. (2018). Depth camera indoor mapping for 3D virtual radio play. *The Photogrammetric Record* 33(162), 171-195. <https://doi.org/10.1111/phor.12239>.
- Wei, O., Chin, C., Majid, Z. & Setan, H. (2011). Documentation and preservation of historical monument using terrestrial laser scanning.
- Wutke, J. D. (2006). Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil. <https://acervodigital.ufrpr.br/handle/1884/5958>.