

SISTEMA VISUAL PARA A RECONSTRUÇÃO 3D DE CENAS EM UM AMBIENTE SUBMARINO USANDO CÂMERAS GOPRO

RÂNIK GUIDOLINI* JULIANA AMORIM GUIMARÃES* MARIELLA BERGER ANDRADE† THIAGO OLIVEIRA DOS SANTOS* EDILSON AGUIAR*

**Laboratório de Computação de Alto Desempenho
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

*†Centro de Referência em Formação e em Educação a Distância
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Email: ranik@lcad.inf.ufes.br, guimaraesajuliana@gmail.com,
mariella.andrade@ifes.edu.br, todsantos@inf.ufes.br, edilson.de.aguiar@googlemail.com

Abstract— The reconstruction process is characterized by transforming a set of images of a real environment in a three-dimensional scene (3D) digital. For this, we need equipment capable of capturing the real 3D scene information and a computer system to process this information and transforms it into a 3D digital model. The most common 3D reconstruction systems are used in terrestrial environments. Among the 3D reconstruction techniques, the stereo camera based systems have the most cost-effective, good accuracy at a lower cost than other techniques. Furthermore, data acquisition can be performed much easier with visual systems when compared with other systems. For underwater environments, visual 3D reconstruction systems are still little used, despite the huge interest in applications in industry, mainly in the oil for the automation of coupling processes and tracking. In this paper, we present a visual system for submarine 3D reconstruction using GoPros. We investigate the main challenges of this environment: adjustment under the water, alignment and rectification of images and extraction of depth of information. Efficiency of the system was validated by analyzing qualitatively and quantitatively the results of reconstructions underwater environment. Qualitative experiments demonstrated the ability of our system to reproduce the original shapes of objects, and quantitative experiments demonstrated the ability of our system to measure the reconstructed objects with precision. In general, the shape of the reconstructed objects are maintained, and the error in measurement accuracy of the measurements is below 2,5%

Keywords— 3D Reconstruction, Submarine System, Applications, Stereo GoPro, Automation.

Resumo— O processo de reconstrução tridimensional (3D) se caracteriza por transformar um conjunto de imagens de um ambiente real em uma cena 3D digital. Para isso, são necessários equipamentos capazes de capturar a informação da cena real e um sistema computacional para processar essa informação e transformá-la em um modelo digital 3D. Dentre as técnicas de reconstrução 3D, os sistemas baseados em câmeras estéreo apresentam o melhor custo-benefício: boa precisão a um custo mais baixo que outras técnicas. Para ambientes submarinos, sistemas visuais de reconstrução 3D ainda são pouco usados, apesar do enorme interesse em aplicações na indústria, principalmente na petrolífera para a automação de processos de acoplamento e rastreamento. Neste trabalho, apresentamos um sistema visual de reconstrução 3D submarino usando câmeras GoPro. Nós investigamos soluções para os principais desafios desse ambiente: calibração embaixo d'água, alinhamento e retificação das imagens e extração da nuvem de pontos. A eficiência do sistema foi validada analisando quantitativamente e qualitativamente os resultados das reconstruções em um ambiente submarino. Os experimentos qualitativos demonstraram a capacidade do nosso sistema em reproduzir as formas originais dos objetos, e os experimentos quantitativos demonstraram a capacidade do nosso sistema em medir os objetos reconstruídos com precisão. Como resultado, a forma dos objetos reconstruídos são mantidas e o erro médio na precisão do sistema fica abaixo de 2,5%.

Palavras-chave— Reconstrução 3D, Ambiente Submarino, Aplicações, GoPro Estéreo, Automação.

1 Introdução

Com a descoberta do pré-sal no Brasil, a exploração de petróleo em alto mar se tornou uma tarefa indispensável para o país, apesar dos enormes desafios apresentados, como por exemplo os procedimentos complexos para a inicialização do poço e sua operação, incluindo movimentação, manutenção e monitoramento de tubos, conexões e equipamentos. Atualmente, o posicionamento desses objetos e equipamentos muitas vezes ainda é realizado através de uma visualização precária em duas dimensões pelas câmeras dos ROVs, ou através de hidroacústica para acoplamento em uma coordenada ou relativamente a outro equipamento. Esse processo é muito demorado e custoso, devido principalmente à falta de visualização 3D e informação

métrica precisa sobre a forma dos objetos encontradas no ambiente submarino. Apesar de existirem muitos sistemas de reconstrução 3D terrestres na literatura, a criação de um sistema submarino eficiente ainda é uma tarefa complexa. Com um sistema de reconstrução 3D submarino, pode-se capturar os objetos e suas formas de uma cena 3D submersa e recriá-la em um ambiente 3D digital com precisão.

Dentre as técnicas de reconstrução 3D mais comuns temos as que utilizam a câmera Microsoft Kinect, sistemas baseados em sonar, sistemas que utilizam câmeras mono e câmeras estéreo, entre outros. A câmera Microsoft Kinect tem se popularizado na área de reconstrução 3D pelo seu baixo custo e pela fácil utilização, porém, como

seu sensor de profundidades é baseado na projeção de raios infravermelhos, é praticamente impossível utilizá-lo a luz do dia (Hemmat et al., 2014), (Tsui et al., 2014) ou em um ambiente submarino. Sistemas baseados em sonares não são afetados pelas condições de iluminação e apresentam um longo alcance embaixo d'água, embora ao custo de uma baixa resolução, maior dificuldade na extração dos dados e grande sensibilidade a ruído (Zerr and Stage, 1996), (Guerneve and Petillot, 2015). A reconstrução 3D com câmeras monoculares utiliza várias imagens da mesma cena para estimar as distâncias de cada ponto da cena até a câmera. Porém, infelizmente, este processo possui pouca precisão (Piniés et al., 2015), (Rzhanov et al., 2014), (Diskin and Asari, 2013).

Neste trabalho, criamos um sistema submarino usando um par de câmeras GoPro e estendemos as técnicas baseadas em câmeras estéreo terrestre (Rzhanov et al., 2014), (Beall et al., 2010), (Geiger, Ziegler and Stiller, 2011), (Schmidt and Rzhanov, 2012), (Wu et al., 2013) para o ambiente submarino. O sistema GoPro estéreo possui um grande potencial para a reconstrução 3D em ambiente submarino, pois além de ser mais barato, ele é leve, pequeno, à prova d'água, possui controle de acesso remoto e, por ser alimentado por bateria interna, pode funcionar por um longo período de tempo. Nosso sistema de reconstrução submarino usando câmeras GoPro é composto pelas etapas de calibração, retificação e reconstrução. A eficiência do sistema implementado é demonstrado por experimentos qualitativos e quantitativos nos quais se pode verificar a capacidade do sistema em replicar a forma dos objetos submersos e aferir com precisão as dimensões dos mesmos.

2 Sistema Visual de Reconstrução 3D Submarino

Considerando o sistema GoPro estéreo detalhado na seção 2.4, a reconstrução 3D de cenas em um ambiente submarino é feita em três etapas. Na primeira etapa é feita a calibração do sistema utilizando as técnicas de visão computacional que permitem, a partir de diversas imagens de um quadro de calibração, extrair os parâmetros internos e externos das câmeras. A segunda etapa é a retificação das imagens. Utilizando os parâmetros obtidos na calibração, as imagens podem ser alinhadas fazendo com que pontos correspondentes sejam localizados na mesma linha horizontal. Por fim, a reconstrução utiliza o par de imagens retificadas e os parâmetros da câmera para gerar uma nuvem de pontos que recria a cena 3D de forma digital.

Esse processo é ilustrado na Figura 1. Inicialmente é feita a captura da base de imagens para a calibração, com o quadro e a câmera totalmente submersos. As imagens são utilizadas pela etapa de calibração para se determinar os parâmetros in-

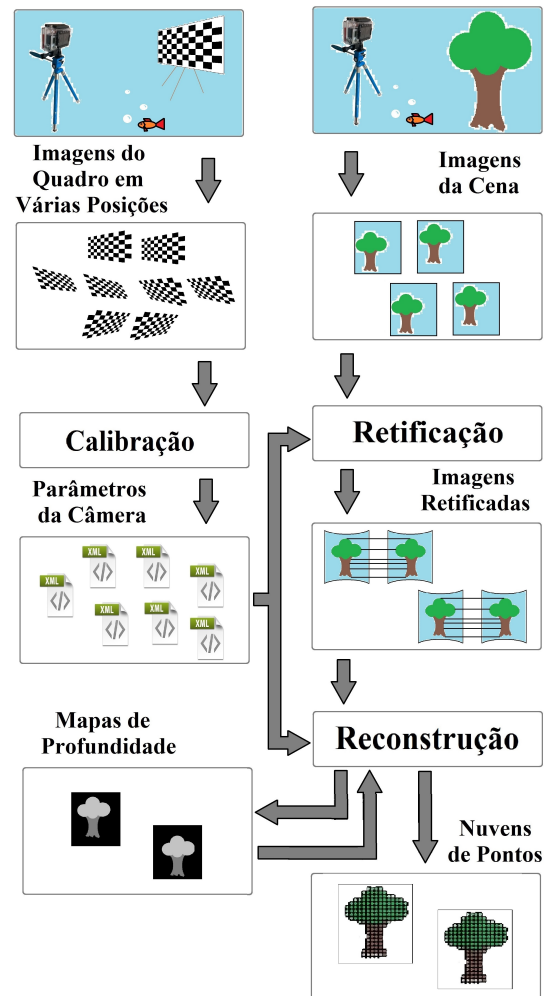


Figura 1: Ilustração do processo de reconstrução 3D de cenas em um ambiente submarino utilizando o sistema GoPro estéreo.

ternos e externos das câmeras. Em seguida é feita a captura das imagens da cena para serem reconstruídas, com o objeto de interesse e a câmera totalmente submersos. Para cada par de imagens, a etapa de retificação processa as imagens utilizando os parâmetros da câmera calculados na etapa de calibração para alinhá-las e retificá-las. A última etapa, reconstrução, processa cada par de imagens retificados gerando os mapas de disparidades. A partir dos mapas de disparidade e dos parâmetros de calibração das câmeras, uma nuvem de pontos é gerada, reconstruindo a cena 3D.

2.1 Calibração do Sistema Estéreo

O processo de calibração tem por objetivo extrair os parâmetros da estrutura da câmera e os seus sistemas de coordenadas (Bradski and Kaehler, 2008). Para que o processo de calibração seja bem-sucedido, é preciso que o sistema estéreo seja sincronizado, ou seja, que a câmera da esquerda capture a imagem no exato instante de tempo que a câmera da direita. O processo de calibração é iniciado com a obtenção dos pares de imagens do quadro de calibração. A Figura 2 mostra algumas imagens do quadro de calibração submerso em diferentes posições. Para extração dos parâmetros da câmera é necessário identificar e marcar

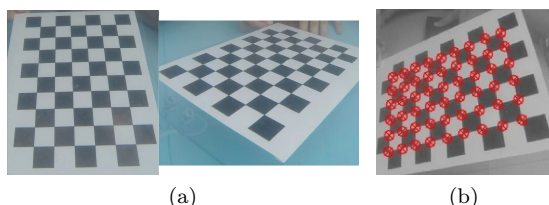


Figura 2: Em (a) é possível ver imagens do quadro de calibração submerso e em (b) temos a imagem do quadro submerso após a marcação dos cantos.

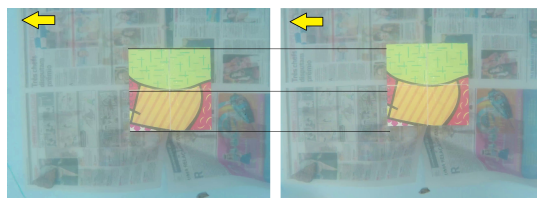


Figura 3: Par de imagens não retificadas. Linhas em preto apontam o desalinhamento do objeto nas imagens.

as posições dos cantos dos quadrados em diversas imagens do quadro de calibração, cada uma com o quadro em uma posição diferente. Essa identificação e marcação é feita de forma automática usando Harris and Stephens (1988). Considerando as marcações e as dimensões do quadro, utilizamos o método de Zhang (2000) para obter os parâmetros internos (distância focal, ponto principal, coeficiente de inclinação e os coeficientes de distorção) e externos (matriz de rotação e vetor de translação). Durante nossos experimentos, verificamos que o método Zhang (2000) comportou-se melhor em nosso problema se comparado a Heikkilä and Silven (1997) ou Tsai (1987).

2.2 Retificação das Imagens

O processo de retificação tem como objetivo trazer as imagens das duas câmeras para um mesmo plano, de forma a alinhá-las usando os parâmetros da calibração, para que pontos correspondentes estejam na mesma linha horizontal em ambas as imagens. Com essa correção, a busca pela correspondência correta entre os pixels durante a construção do mapa de disparidade é facilitada.

A Figura 3 apresenta um par de imagens não retificadas de um objeto submerso. Na figura é possível observar pelas linhas pretas que o objeto na imagem da direita está mais acima em relação ao objeto na imagem da esquerda. Como o sistema estéreo possui um espaçamento entre seus centros óticos (*baseline*), estas irão capturar partes distintas da cena. As setas amarelas apontam esta diferença nas imagens: na imagem esquerda uma parte do fundo da piscina em azul foi capturada.

A Figura 4 mostra o par de imagens após o processo de retificação usando o algoritmo de Boughet (2015). As linhas pretas ajudam a demonstrar que o objeto está alinhado em ambas as imagens. As setas amarelas apontam uma deformação nas bordas da imagem, proveniente do processo de retificação. Acreditamos que esse ruído é causado pelo desalinhamento horizontal dos cen-

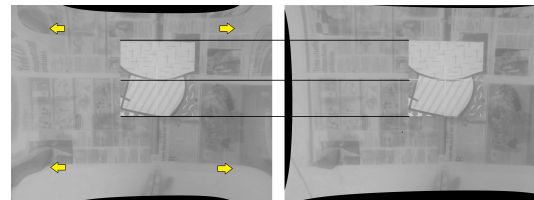


Figura 4: Par de imagens retificadas. Linhas em preto ilustram o alinhamento do objeto.

tros ópticos das câmeras do sistema GoPro estéreo, o que limita o processo de retificação. Quanto mais desalinhadas horizontalmente estão as câmeras, menor é a eficiência do processo de retificação (Bradski and Kaehler, 2008). As imagens retificadas são geradas em escala de cinza pois o nosso processo de reconstrução não leva em consideração as informações de cor. Vale a pena ressaltar que durante nossos experimentos, o algoritmo de Boughet (2015) produziu imagens retificadas menos distorcidas se comparado ao método Hartley (1999).

2.3 Reconstrução

O processo de reconstrução consiste na geração da cena real em um espaço tridimensional digital. Primeiramente, a partir dos parâmetros de calibração e do par de imagens retificadas, geramos um mapa de disparidade. O mapa de disparidade é composto por pixels em uma escala de cinza definindo objetos na imagem que estão mais próximos da câmera (pixels próximos do branco) e objetos que estão mais distantes da câmera (pixels próximos do preto). Para gerar o mapa de disparidades leva-se em consideração o ponto da cena 3D real representado na imagem da câmera esquerda na posição x^l e na imagem da câmera direita x^r , a distância focal f e o *baseline* T . A distância do ponto na cena real em relação a câmera, valor Z , é calculado usando a equação 1:

$$Z = \frac{f \times T}{(x^l - x^r)} \quad (1)$$

A grande complexidade na geração de mapas de disparidade é encontrar a correspondência de pixels nas imagens de ambas as câmeras, e devido a sua importância, métodos para resolver este problema tem sido amplamente desenvolvidos. Entre os mais eficientes temos os métodos de larga escala (Geiger, Roser and Urtasun, 2011), densos (Geiger, Ziegler and Stiller, 2011), de larga escala densos (Alcantarilla et al., 2013) e de segmentação (Yamaguchi, 2015). Durante nossos experimentos verificamos que o método de segmentação apresenta o melhor resultado para o ambiente submarino.

A Figura 5 apresenta o mapa de disparidade gerado a partir das imagens retificadas da Figura 4 pelo método de segmentação (Yamaguchi, 2015). É possível notar o ruído nas bordas do mapa de disparidade, proveniente da distorção nas bordas das imagens retificadas, Figura 4. Nós eliminamos



Figura 5: Mapas de disparidades com o ruído da retificação (a) e após a retirada do ruído (b).

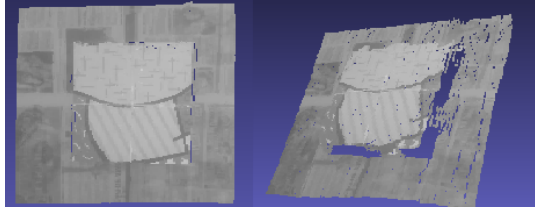


Figura 6: Duas visualizações da nuvem de pontos resultante da reconstrução submarina de uma caixa.

esse ruído automaticamente, fazendo um recorte a partir do centro da imagem contendo o objeto de interesse. A partir do mapa de disparidade, dos parâmetros da calibração e das imagens retificadas da câmera esquerda, construímos a matriz de calibração Q .

Na matriz, os parâmetros, c_x e c_y são os pontos principais das câmeras, T_x é a translação do sistema estéreo em relação a câmera esquerda, f é a distância focal e c'_x é a coordenada do ponto principal x na imagem direita.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_x} & \frac{(c_x - c'_x)}{T_x} \end{bmatrix}$$

A posição 3D de cada ponto na nuvem de ponto é calculada a partir dos elementos da matriz de reconstrução da câmera Q e do mapa de disparidades, baseadas na posição do pixel no mapa de disparidades (px , py) e o valor da disparidade no ponto (d), conforme descrito pelas equações de 2, 3 e 4, onde q_{nm} representa o elemento localizado na linha n e na coluna m da matriz Q .

$$x = \frac{py + q_{14}}{(-d \times q_{42}) + q_{44}} \quad (2)$$

$$y = \frac{px + q_{24}}{(-d \times q_{42}) + q_{44}} \quad (3)$$

$$z = \frac{q_{34}}{(-d \times q_{42}) + q_{44}} \quad (4)$$

Um exemplo da nuvem de ponto texturizada é apresentado na Figura 6.

2.4 Sistema GoPro estéreo

Cada câmera GoPro que compõe o sistema GoPro estéreo, mostrado na Figura 7, possui resolução de 12 megapixels, memória de 32GB expandida por cartão micro SD. O sistema GoPro estéreo mede aproximadamente $17 \times 8 \times 4cm$, pesa menos de 380g, é submergível até 60m de profundidade e



Figura 7: Sistema GoPro estéreo composto por duas câmeras GoPro, case stereo submergível e cabo de sincronização.

possui controle remoto à prova d'água até 3m de profundidade. O sistema GoPro estéreo é sincronizado pelo cabo de sincronização, que é acoplado ao par de câmeras. Verificamos esse sincronismo capturando imagens de um relógio com precisão de milésimos de segundo. No nosso sistema as câmeras são fixadas através do case submergível em acrílico. Isso é importante porque garante que as duas câmeras estejam fixas uma em relação a outra. Iniciado o processo de calibração e reconstrução, se houver deslocamento de uma das câmeras em relação a outra, todos os parâmetros calculados são alterados e deve-se reiniciar o processo.

O sistema GoPro estéreo é uma alternativa eficiente e relativamente de baixo custo, se comparado com outros sistemas estéreos à prova d'água, além de ser leve, pequeno e por ser alimentado por bateria interna. Apesar das vantagens, percebemos algumas limitações: a câmera apresenta uma alta distorção radial devido a seu ângulo de visão de 170° . Essa limitação é contornada por técnicas de remoção de distorção através da calibração (Bradski and Kaehler, 2008). Outra limitação é causada pelo efeito de arrasto em objetos capturados em movimento, já que a câmera utiliza o sistema de captura *rolling shutter*. Para minimizar esse efeito de arrasto evitamos movimentos bruscos com a câmera ou com os objetos durante a captura das imagens.

3 Experimentos e Resultados

Os experimentos em ambiente submarino foram realizados em uma piscina com 70cm de profundidade. Para a captura das imagens do quadro de calibração, fixamos o sistema GoPro estéreo em um tripé. Capturamos 72 pares de imagens do quadro de calibração em diferentes posições: imagens com a face do quadro voltadas para baixo, para cima, para direita e para esquerda, girando o quadro em 45° e repetindo este processo até que o quadro tenha retornado à posição inicial. Vale ressaltar a importância de evitar reflexos no quadro de calibração, pois isto prejudica a marcação automática dos quadrados.

Em seguida, as imagens dos objetos de interesse foram capturadas movendo-se o sistema GoPro estéreo. Durante a captura das imagens, respeitamos a distância limite de cerca de 1,5m, que é limitada pelo *baseline* do sistema GoPro estéreo. Os objetos utilizados foram um cilindro e uma caixa de dimensões $20,4 \times 20,4 \times 4,6cm$. O

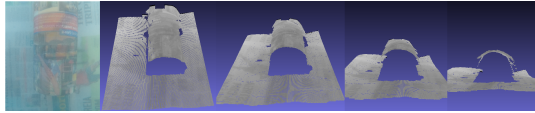


Figura 8: Imagem da câmera esquerda de um cilindro e quatro visualizações da reconstrução 3D da cena.

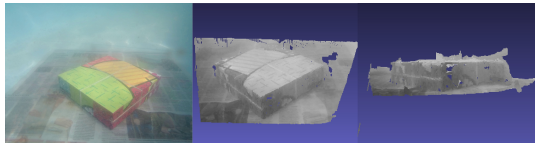


Figura 9: Imagem da câmera esquerda mostrando as três faces da caixa e duas visualizações da reconstrução gerada por ela.

Tabela 1: Medições e erros da reconstrução do objeto ($20,4 \times 20,4 \times 4,6\text{cm}$) em ambiente submarino. As colunas M_X , M_Y e M_Z apresentam as medições realizadas nos eixos x, y e z, respectivamente, em centímetros (cm). As colunas E_X , E_Y e E_Z mostram o percentual (%) do erro na reconstrução nos eixos x, y e z, respectivamente. As linhas E_M e σ apresentam o erro médio e o desvio padrão.

Img	M_X	E_X	M_Y	E_Y	M_Z	E_Z
1	20,13	1,34	20,32	0,39	4,53	1,56
2	19,87	2,67	19,98	2,10	4,47	2,91
3	20,54	0,69	20,60	0,98	4,55	1,10
E_M		1,56		1,16		1,85
σ		0,82		0,71		0,77

cilindro foi utilizado para conferir o formato da reconstrução e a caixa foi medida de forma a verificar a precisão do sistema de reconstrução. As medições reais foram feitas utilizando-se uma régua, e nas nuvens de pontos reconstruídas utilizamos o programa gratuito Meshlab (Cignoni, 2010). Note que objetos texturizados são utilizados para facilitar o processo de retificação, já que eles simplificam a busca por correspondências de pixels, em relação a objetos com textura homogênea.

Para a validação do nosso sistema de reconstrução, primeiramente verificamos a capacidade em replicar a forma dos objetos; em seguida, a precisão na reconstrução. Foram feitas diversas reconstruções para medir a precisão nos eixos X, Y e Z, sendo cada reconstrução feita com a câmera a uma distância diferente do objeto, indo de 15cm a 70cm. A Figura 8 mostra a reconstrução da parte superior de um objeto cilíndrico submerso, na qual segundo o critério visual, a forma do objeto foi reconstruída de maneira satisfatória. O resultado da reconstrução da caixa submersa é mostrada na Figura 9. A partir dessa mesma orientação da câmera em relação ao objeto, fizemos três reconstruções com diferentes distâncias entre câmera e objeto. Cada reconstrução foi usada para validar a precisão da reconstrução considerando os eixos X, Y e Z. As medições estão apresentadas na Tabela 1. A Figura 10 mostra a imagem da câmera esquerda com a vista superior da caixa submersa e duas visualizações da reconstrução resultante. Na Tabela 2 observa-se os dados de três reconstruções em posições diferentes da vista superior da caixa embaixo d'água. Como esta é uma reconstrução da parte superior da caixa, não temos infor-



Figura 10: Imagem da câmera esquerda com a vista superior da caixa debaixo d'água e duas visualizações da reconstrução gerada.

Tabela 2: Medições e erros da reconstrução de objeto quadrado com 20,4cm de lado embaixo d'água. As colunas M_X , M_Y , apresentam as medições horizontal e vertical, respectivamente, em cm. As colunas E_X e E_Y mostram o percentual (%) de erro horizontal e vertical, respectivamente. As linhas E_M e σ apresentam o erro médio e o desvio padrão.

Img	M_X	E_X	M_Y	E_Y
1	20,87	2,30	20,58	0,09
2	20,95	2,70	20,76	1,76
3	20,76	1,76	21,35	4,66
E_M		2,25		2,17
σ		0,38		1,88

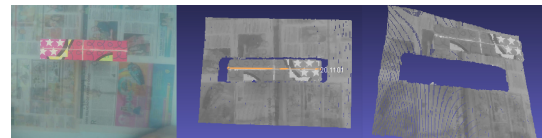


Figura 11: Imagem da câmera esquerda de objeto retangular embaixo d'água e vista superior da reconstrução gerado por ela.

Tabela 3: Medições e erros da reconstrução de objeto retangular embaixo d'água com dimensões $20,4 \times 4,6\text{cm}$. As colunas M_X , M_Y , apresentam as medições horizontal e vertical, respectivamente, em cm. As colunas E_X e E_Y mostram o percentual (%) de erro horizontal e vertical, respectivamente. As linhas E_M e σ apresentam o erro médio e o desvio padrão.

Img	M_X	E_X	M_Y	E_Y
1	20,44	0,02	4,65	1,08
2	20,07	1,64	4,59	2,17
3	20,98	2,84	4,71	2,39
E_M		1,5		1,88
σ		1,15		0,57

mação suficiente para realizar a medição no eixo Z. A Figura 11 apresenta a vista lateral da caixa submersa e duas visualizações de uma reconstrução resultante. A Tabela 3 apresenta as medições de três reconstruções em posições diferentes e os respectivos erros nas medidas da reconstrução. Como verificado nas figuras e tabelas, o sistema desenvolvido é capaz de reproduzir o formato dos objetos e reconstruí-los com uma alta precisão em um ambiente submarino. Vale ressaltar que realizamos também experimentos com o sistema GoPro estéreo em ambiente terrestre e os resultados foram também satisfatórios. O código das ferramentas implementadas e as bases de dados geradas estão disponíveis no link: [https://\(disponível na versão final do artigo\)](https://(disponível na versão final do artigo)) sob a licença pública geral GNU.

4 Conclusões

Neste artigo, apresentamos um sistema de reconstrução 3D para o ambiente submarino, usando um par de câmeras GoPro, capaz de transformar um conjunto de imagens de um ambiente submarino em uma cena tridimensional (3D) digital. O sistema é calibrado com imagens submarinas. Para cada par de imagem a ser reconstruída, usamos a calibração para fazermos o alinhamento e a re-

tificação das imagens. Em seguida, um mapa de disparidade é gerado e uma nuvem de pontos representando a cena é reconstruída. A eficiência do sistema foi validada por experimentos qualitativos que demonstraram a capacidade do nosso sistema em reproduzir as formas originais dos objetos, e por experimentos quantitativos que demonstraram a capacidade do nosso sistema em medir os objetos reconstruídos com precisão superior a 97,5%.

Atualmente, para o correto funcionamento do sistema de reconstrução é preciso que tanto as imagens de calibração quanto as imagens do objeto a ser reconstruído sejam capturadas debaixo d'água. Enquanto existem métodos que realizam a calibração fora d'água e depois aplicam um fator de correção na calibração para permitir que esta seja aplicada a reconstrução em ambiente submarino (Lavest et al., 2003), decidimos por fazer ambos os processos dentro d'água.

Desejamos verificar o impacto na eficiência das reconstruções com um processo híbrido como trabalho futuro. Pretendemos também explorar os efeitos de atenuação, dispersão e refração em outros ambientes submarinos usando o nosso sistema GoPro estéreo. Por exemplo, é importante analisar o comportamento do nosso sistema em um ambiente marítimo em diferentes profundidades e com diferentes iluminações. Outra alteração relevante seria a incorporação de um algoritmo de odometria visual que permita integrar diversas nuvens de pontos de forma a permitir a reconstrução completa do objeto.

Referências

- Alcantarilla, P. F., Beall, C. and Dellaert, F. (2013). Large-scale dense 3d reconstruction from stereo imagery, *PPNIV13*.
- Beall, C., Lawrence, B. J., Ila, V. and Dellaert, F. (2010). 3d reconstruction of underwater structures, *IROS*, pp. 4418–4423.
- Boughet, J. Y. (2015). Camera calibration toolbox for matlab, <http://goo.gl/o13GJp>.
- Bradski, G. R. and Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV*, O'Reilly.
- Cignoni, P. (2010). MeshLab, <http://meshlab.sourceforge.net/>.
- Diskin, Y. and Asari, V. K. (2013). Dense 3d point-cloud model using optical flow for a monocular reconstruction system, *AIPR*, pp. 1–6.
- Geiger, A., Roser, M. and Urtasun, R. (2011). Efficient large-scale stereo matching, *ACCV*, ACCV'10, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 25–38.
- Geiger, A., Ziegler, J. and Stiller, C. (2011). Stereoscan, *IV*, pp. 963–968.
- Guerneve, T. and Petillot, Y. (2015). Underwater 3d reconstruction using blueview imaging sonar, *OCEANS*, pp. 1–7.
- Harris, C. and Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector, *AVC*, pp. 147–151.
- Hartley, R. I. (1999). Theory and practice of projective rectification, *IJCV* **35**(2): 115–127.
- Heikkila, J. and Silven, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, *CVPR*, pp. 1106–1112.
- Hemmat, H. J., Bondarev, E., Dubbelman, G. and d. With, P. H. N. (2014). Evaluation of distance-aware kinfu algorithm for stereo outdoor data, *VISAPP*, Vol. 2, pp. 746–751.
- Lavest, J. M., Rives, G. and Lapresté, J. T. (2003). Dry camera calibration for underwater applications, *MVA* (5-6): 245–253.
- Piniés, P., Paz, L. M. and Newman, P. (2015). Dense mono reconstruction: Living with the pain of the plain plane, *ICRA*, pp. 5226–5231.
- Rzhanov, Y., Hu, H. and Boyer, T. (2014). Dense reconstruction of underwater scenes from monocular sequences of images, *OCEANS*, pp. 1–5.
- Schmidt, V. E. and Rzhanov, Y. (2012). Measurement of micro-bathymetry with a gopro underwater stereo camera pair, *OCEANS*, pp. 1–6.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses, *IJRA* **3**(4): 323–344.
- Tsui, C. L., Schipf, D., Lin, K. R., Leang, J., Hsieh, F. J. and Wang, W. C. (2014). Using a time of flight method for underwater 3-dimensional depth measurements and point cloud imaging, *OCEANS*, pp. 1–6.
- Wu, Y., Nian, R. and He, B. (2013). 3d reconstruction model of underwater environment in stereo vision system, *OCEANS*, pp. 1–4.
- Yamaguchi, K. (2015). Slanted plane smoothing stereo, <http://goo.gl/RpSck2>.
- Zerr, B. and Stage, B. (1996). Three-dimensional reconstruction of underwater objects from a sequence of sonar images, *ICIP*, Vol. 3, pp. 927–930 vol.3.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration, *TPAMI* **22**(11): 1330–1334.