

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/7: 1317-1329
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

PRÉ-ALINHAMENTO E REGISTRO DE NUVENS DE PONTOS OBTIDAS COM UMA CÂMERA DE DISTÂNCIA PMD CAMCUBE 3

*Pre-alignment and Registration of Point Clouds using the PMD
CamCube 3 Range Camera Data*

João Henrique Becker & Jorge Antonio Silva Centeno

Universidade Federal do Paraná – UFPR
Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Departamento de Geomática
Caixa Postal 19001, 81.531-990 Curitiba, Paraná, Brasil
joaohbecker@yahoo.com.br, centeno@ufpr.br

Recebido em 20 de Agosto, 2015/ Aceito em 21 de Julho, 2016
Received on August 20, 2015/ Accepted on July 21, 2016

RESUMO

As câmeras de distância são dispositivos que utilizam o princípio do Time-of-Flight para a obtenção de imagens de distância. O sensor é um sensor de quadro que captura imagens de profundidade com alta frequência de coleta, das quais se derivam nuvens de pontos tridimensionais. Neste artigo são mostrados os resultados de uma pesquisa relacionada à sua utilização para levantamentos tridimensionais. No trabalho as nuvens de pontos são combinadas usando o método Iterative Closest Point. Como este método requer um pré-alinhamento, um método de pré-alinhamento que analisa partes das imagens em lugar de toda a imagem é proposto. A qualidade da nuvem de pontos obtida com a PMD CamCube 3.0 é avaliada comparando o resultado com uma nuvem de pontos obtida por varredura a LASER. Durante este processo, notou-se o acúmulo de distorções e ruído nas nuvens obtidas com a câmera de distância, devido a seu princípio de funcionamento. Apesar disso, os resultados mostram que o processo de registro permitiu obter um alinhamento adequado e comprova que este dispositivo pode ser usado para obtenção de dados tridimensionais ou para complementar áreas de oclusão ou sombra em dados de varredura a LASER.

Palavras chaves: Câmera de Distância, Time-of-Flight, Registro Geométrico, ICP.

ABSTRACT

Range cameras are devices that use the Time-of-Flight principle for distance measurement. In this article it is shown the results of a research related to the use of these devices in 3D surveys. The frame sensor captures images with a high rate. The range images are then used to compute three-dimensional point clouds. To cover a larger area, several clouds must be obtained and combined through the registration process. In this research, two aspects are analyzed: the geometric registration quality and the viability of the use of these images to complement data obtained by LASER scanning. The point clouds are combined using the Iterative Closest Point method. As the success of this method depends on the quality of a pre-alignment step, it is introduced a pre-alignment method which analyses parts of images instead of the whole image. The quality of the point cloud obtained with the PMD CamCube 3.0 camera is evaluated by comparing the result to a point cloud obtained by LASER scanning, with better precision and accuracy. It was noted

that noise and image distortions, proper of such images, affect the results. Nevertheless, the results obtained show that the registration process allows for a proper alignment and prove that this device can be used to obtain three-dimensional data or to complement areas of occlusion or shadow on LASER scanning data.

Keywords: Range Camera, Time-of-Flight, Geometric Registration, Iterative Closest Point, ICP.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por informações métricas tridimensionais cresceu nos últimos anos impulsionando o desenvolvimento de novas ferramentas e métodos para a coleta de dados e informações espaciais. Entre as aplicações que usam a modelagem tridimensional, pode-se citar o mapeamento de infraestrutura como para a atualização de plantas de fábricas ou aeroportos, que sofrem constantes modificações; preservação de patrimônio histórico, como teatros ou edificações históricas; vias de acesso para pedestres, incluindo escadarias e rampas para facilitar a determinação de vias de fuga em situações de emergência e na mineração, para o mapeamento de túneis.

Tratando-se de ambientes internos, uma opção muito usada é a varredura a LASER (light amplification by stimulated emission of radiation), que consiste em medir, usando um raio LASER, as distâncias para uma grande quantidade de pontos na superfície dos objetos. O resultado, um conjunto de dados tridimensionais, é também denominado de “nuvem de pontos” ou “point cloud”. Este método é eficiente, porém também apresenta algumas limitações, como o tempo necessário para fazer uma varredura. Como apenas um ponto é medido a cada instante, é impossível levantar ambientes dinâmicos e objetos em movimento, pois o mesmo ponto pode aparecer em duas posições diferentes. Outra desvantagem é a ocorrência de áreas de oclusão, áreas não iluminadas pelo sistema, que resultam em áreas vazias, sem medições.

Um exemplo onde são visíveis as vantagens do uso de câmeras de distância é a modelagem de deformações de vigas. Técnicas baseadas em imagens como o uso de câmeras digitais e algoritmos de fotogrametria como Structure from Motion ou varredura a LASER têm comprovada eficiência como métodos precisos e para medição de deslocamentos devido a esforços de flexão sob condições de carregamento estático. No entanto, para obter informações adequadas sobre o efeito

da flexão de vigas submetidas a cargas dinâmicas em tempo real, estes métodos não são eficientes. No caso da fotogrametria as imagens são obtidas, e processadas, em tempos diferentes, logo a correspondência espacial não é possível. No caso da varredura a LASER, deve-se considerar que durante o tempo da varredura da cena os objetos se deslocam e podem mudar de posição enquanto a varredura recobre outra região. Neste exemplo de aplicação, a captura de imagens de profundidade com sensor de quadro, permite o monitoramento dos deslocamentos em tempo real, como é comprovado em Qi *et al.* (2014).

Câmeras de distância são apropriadas para coleta de dados de objetos em movimento, pois oferecem alta taxa de coleta de imagens. Devido ao seu tamanho e captura em quadro, este tipo de equipamento também apresenta vantagens no levantamento de ambientes onde existam muitas obstruções, onde diversas ocupações seriam necessárias utilizando um sistema de varredura a LASER. Além disso, estas câmeras podem ser empregadas para complementar um levantamento realizado com um sistema de varredura a LASER, coletando dados de áreas de oclusão. Reduzindo, assim, o número de ocupações necessárias com o sistema de varredura a LASER. Desta forma, a câmera de distância se apresenta como alternativa para o levantamento tridimensional de ambientes internos, mas deve se levar em consideração sua reduzida abertura angular e pequeno alcance de medição.

Uma maneira de aumentar a área coberta por uma câmera de distância é adquirindo uma série de imagens de profundidade com alta sobreposição, pois este dispositivo tem alta taxa de captura, em torno de 40 FPS (frames por segundo). Utilizando métodos de registro geométrico é possível aumentar a área coberta e assim torna-se possível se obter uma densa nuvem de pontos.

Neste artigo são apresentados os resultados de um estudo que visa avaliar a viabilidade do uso

de uma série de imagens de câmeras de distância para modelar ambientes internos. Também é introduzido um método de alinhamento prévio para facilitar o registro geométrico.

O artigo é organizado da seguinte maneira. Na segunda seção é descrito sucintamente o princípio de funcionamento do equipamento usado e a revisão de literatura a respeito de métodos de registro de nuvens de pontos. Na terceira seção é descrita a metodologia proposta e na quarta seção são apresentados os resultados alcançados. Finalmente, a discussão é apresentada na seção cinco.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A câmera de distância obtém dados de profundidade (Range) através do princípio time-of-flight (TOF). Nestes dispositivos, a medição de distância é realizada analisando a diferença de fase entre a onda emitida e a onda recebida, refletida pela superfície. A determinação da distância pela diferença de fase permite a utilização de fontes de energia com pouca potência, como emissores LED, por isso é mais barata em relação à varredura a LASER. A medição pela diferença de fase tem a limitação, porém, da distância depender da frequência de modulação do sinal, sendo a distância máxima a ser mensurada sem ambiguidades a metade do comprimento de onda do sinal. Maiores detalhes podem ser encontrados em Lange (2000).

A câmera de distância utilizada foi a PMD CamCube 3.0. Ela utiliza radiação eletromagnética na faixa do infravermelho, possui uma abertura angular fixa de $40^\circ \times 40^\circ$ e alcance máximo de 7,5 metros e, na resolução máxima de 200×200 pixels, uma taxa de repetição de 40 imagens por segundo. Ela gera imagens de profundidade, nas quais cada pixel contém o valor da distância até o objeto. Além disso, pode fornecer também imagens de intensidade e amplitude. A imagem de intensidade sendo a imagem formada com o retorno da energia emitida e a energia presente no ambiente, e a imagem de amplitude sendo a imagem contendo somente o retorno da energia emitida.

2.1 Registro de nuvens de pontos

Como a câmera de distância permite obter imagens com alta frequência, é possível cobrir uma extensa área filmando a área de interesse,

do que resulta uma série de imagens com alta superposição. Porém, a geometria de cada imagem é obtida em relação à câmera. Para combinar estes dados é necessário realizar o registro geométrico entre pares de nuvens de pontos. Este registro é feito encontrando-se a transformação geométrica ideal entre os dois conjuntos, ou seja, aquela que coloque as duas nuvens de pontos num único referencial. A transformação é obtida pela determinação da correspondência de pontos entre os dois conjuntos, que, por sua vez, pode ser realizada baseando-se na disposição, em certas características ou propriedades dos pontos.

Soluções para este problema de registro foram propostas na literatura utilizando diferentes abordagens, sendo que algumas delas dependem de um alinhamento prévio dos dados. Entende-se por alinhamento prévio a orientação geométrica dos dois conjuntos de dados, de maneira que existam e sejam reconhecíveis áreas homólogas entre eles. Alguns dos principais métodos são descritos a seguir.

Normal Distributions Transform (NDT), proposto por Biber e Straßer (2003). Neste método, a nuvem de pontos é analisada no plano 2D horizontal, que é subdividido em células formando uma grade regular. Para cada célula, uma distribuição normal é associada de acordo com a disposição dos pontos e uma função densidade de probabilidade é determinada. A obtenção das correspondências de uma segunda nuvem de pontos ao NDT é então definida pela maximização da soma que os pontos da segunda nuvem obtêm aplicados a esta função densidade de probabilidade. A utilização do plano 2D horizontal faz com que esse método seja melhor aplicado para orientação de robôs, realizando o registro em relação às paredes, por exemplo.

O método de Assinatura Pontual (Point Signature), proposto por Chua e Jarvis (1997), estabelece um histograma (assinatura) para cada ponto ou para um determinado conjunto de pontos de uma superfície. Isto é feito utilizando o vetor normal calculado na vizinhança de cada ponto e o respectivo plano obtido com esta normal. A assinatura pontual é a representação ordenada da vizinhança em relação a este plano. As correspondências entre duas nuvens são encontradas pela comparação das assinaturas calculadas para as duas nuvens. Este método necessita que as superfícies sejam contínuas,

o que não ocorre na prática, exigindo uma interpolação dos dados. Isso resulta no aumento do tempo de processamento e na diminuição da qualidade das assinaturas dos pontos.

O método da Análise da Componente Principal, proposto por Chung *et al.* (1998), compara as componente principais das nuvens de pontos para encontrar a transformação entre elas. Este é um método muito rápido, porém necessita que grande parte dos pontos seja comum às duas nuvens. No caso de superfícies simétricas ou com pequenos detalhes, a solução a ser encontrada na maioria dos casos é inadequada.

O método RANSAC (random sample consensus) Based DARCES (data-aligned rigidity-constrained exhaustive search), proposto por Chen *et al.* (1998), baseia-se no encontro da melhor correspondência de três pontos nas duas nuvens de pontos para estimar a transformação para efetuar o registro. Para encontrar as correspondências as distâncias relativas entre os três pontos de uma nuvem são calculadas e na segunda nuvem buscam-se possíveis correspondências procurando por pontos que apresentem distâncias similares às encontradas na primeira nuvem. Este método é robusto e funciona mesmo na presença de ruído, porém o tempo de execução aumenta significativamente com o aumento do número de pontos.

Brunnström e Stoddart (1996) desenvolveram um método baseado em Algoritmos Genéticos para a solução do problema de registro. O objetivo do método é obter um vetor contendo as correspondências entre os pontos de acordo com uma função de aptidão, baseada em invariantes angulares e de distância dos pontos. O método então pode calcular uma componente de qualidade global e, por meio de operações de mutação e recombinação, encontrar as melhores correspondências e conseqüentemente a transformação entre os pontos. Assim como o método anterior, quando na presença de uma grande quantidade de pontos, o tempo de processamento é alto.

Sample Consensus Initial Aligment é um método para alinhamento inicial baseado em RANSAC desenvolvido por Rusu *et al.* (2009). Ele busca as correspondências sem a necessidade de testar todo o conjunto de pontos com a criação de histogramas para os pontos de acordo com seus n-vizinhos mais próximos. Desta forma, as

potenciais correspondências são somente aquelas que possuem histogramas semelhantes.

Alignment Prerejective (BUCH *et al.*, 2013) é outro método que utiliza RANSAC para o registro, porém, com algumas otimizações. Na comparação dos pontos amostrados, um passo adicional é realizado. É calculada uma proporção comparando os comprimentos dos lados dos polígonos virtuais formados pelos pontos das duas nuvens. Caso esse valor ultrapasse um limiar predefinido, o atual conjunto de potenciais correspondências é descartado e novos pontos são selecionados. Caso aceitas as correspondências, uma transformação inicial é determinada. Esta transformação é aplicada e os pontos correspondentes na segunda nuvem são identificados pelo critério do vizinho mais próximo, o que permite identificar pontos inliers de acordo com um limiar Euclidiano. Se a quantidade de inliers for suficiente, aceitam-se as correspondências iniciais e a transformação é recalculada utilizando somente os inliers. Este processo é repetido até a melhor transformação ser encontrada.

O método Iterative Closest Point (ICP), desenvolvido inicialmente por Besl e McKay (1992), e posteriormente aprimorado em diversos aspectos, busca a transformação desejada através da minimização das distâncias das correspondências. Este método é bastante simples e eficiente, porém para que bons resultados sejam alcançados as nuvens devem ter um grande número de pontos em comum ou ter um alinhamento prévio, caso contrário o método pode convergir para um mínimo local, obtendo um resultado incorreto.

Os métodos descritos anteriormente são algumas das soluções para o problema de registro geométrico presentes na literatura. Para este trabalho, foram utilizados o Sample Consensus Initial Alignment e Aligment Prerejective para o alinhamento inicial e o Iterative Closest Point para o alinhamento preciso.

A qualidade final a ser esperada do registro quando utilizados diferentes tipos de sensores, não é conhecida. Porém, conhecer a qualidade de um produto é crucial para decidir sobre a possibilidade da utilização de um método para dada aplicação. Por isso, há interesse em identificar se o registro geométrico das nuvens de pontos obtidas com esse tipo de sensor gera

resultados com qualidade satisfatória para o usuário e onde se notam problemas.

3. METODOLOGIA

Para avaliar a viabilidade do uso da câmera de distância para o mapeamento de interiores, foi desenvolvido um método baseado no ICP. O processo consiste de quatro etapas: a coleta das imagens de profundidade e cômputo das coordenadas a partir dos valores armazenados em cada pixel, a filtragem de ruído, o alinhamento prévio e o registro propriamente dito. Posteriormente, o resultado produzido foi avaliado em termos geométricos comparando a nuvem de pontos resultante com uma nuvem de referência obtida com a varredura a LASER.

3.1 Local de estudo

O trabalho foi desenvolvido em uma sala da Universidade Federal do Paraná que continha diversos objetos, visando simular uma situação real, como é mostrado na Figura 1. Quando foram realizadas as medições, havia outros objetos não presentes na imagem da Figura 1, como um computador e algumas caixas. O quadro branco também não estava no local.



Fig. 1 - Imagem da sala levantada.

3.2 Coleta dos dados com a câmera

Na Figura 2 é apresentado um esquema da região levantada utilizando a câmera. O caminhamento foi feito acompanhando a orientação das paredes. Quando se media uma parede plana, longe das esquinas, foram feitos deslocamentos de aproximadamente 40 cm, com rotações quase nulas, buscando um recobrimento de aproximadamente 75%. Já as esquinas foram

varridas tentando manter a câmera no mesmo ponto e fazendo rotações de aproximadamente 20° no plano horizontal. Para cada imagem coletada, os efeitos das distorções de lente foram removidos utilizando os parâmetros de calibração da câmera previamente fornecidos.

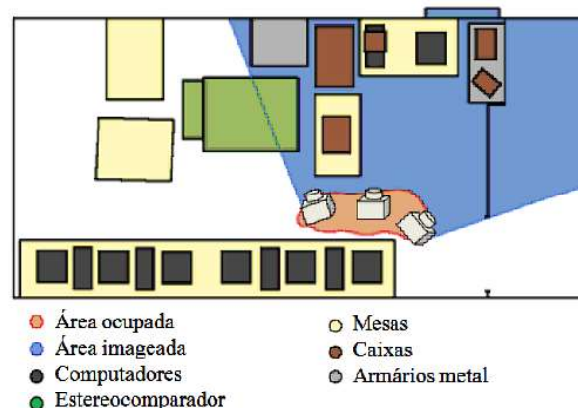


Fig. 2 – Área da sala medida com a câmera.

Na imagem de profundidade, cada pixel armazena como valor digital a distância entre a câmera e a superfície do objeto (profundidade) correspondente. A projeção ortogonal dos pontos no espaço é possível aplicando a transformação às coordenadas fotogramétricas e a profundidade, conforme é descrito em Oliveira (2011). O resultado é uma nuvem de pontos ($200 \times 200 = 40000$ pontos) para cada imagem, no referencial local com origem na câmera e os dois primeiros eixos paralelos ao plano da imagem e o terceiro perpendicular ao mesmo.

Um dos problemas das imagens de profundidade é a presença de ruído, o que gera pontos com coordenadas erradas na nuvem de pontos. Por exemplo, ocorrem pixels flutuantes quando na área coberta por um pixel ocorrem mais de uma superfície localizadas a diferentes distâncias da câmera. Como resultado, uma medição é registrada como sendo a média ponderada entre as duas distâncias. Por isso, antes do registro, foi realizada a filtragem do ruído através do processo de remoção de outliers descrito em Rusu *et al.* (2009), disponibilizado na biblioteca PCL (Point Cloud Library). O filtro baseia-se na análise estatística da vizinhança de cada ponto contido na nuvem. Para cada ponto, a distância média para os seus n vizinhos mais próximos é calculada. Então é calculada a média das distâncias médias (μ) e é computado o desvio-padrão (σ) para toda a nuvem. Define-se um

fator de tolerância para avaliar a distância média para os n -vizinhos mais próximos de cada ponto (α , sendo α um parâmetro de rigorosidade). São considerados ruído os pontos cuja distância for maior que esse fator e, portanto, estes pontos são removidos. Um exemplo do resultado da filtragem é mostrado na Figura 3. Nota-se, por exemplo, que pontos espúrios ocorriam atrás da parede e que no resultado final estes pontos foram eliminados.

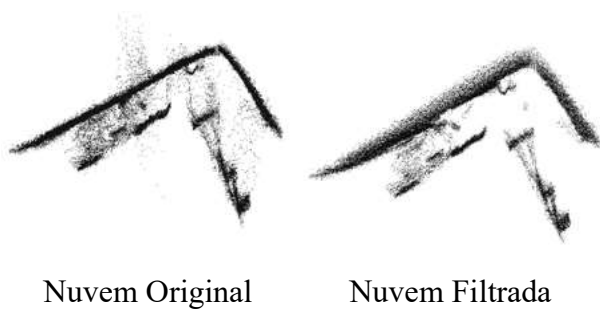


Fig. 3 - Filtragem para a remoção de ruídos.

3.3 Alinhamento prévio

A princípio, cada nuvem de pontos encontra-se associada ao referencial local com origem na câmera e não existe informação prévia a respeito da posição relativa das outras nuvens. Nesta situação o ajuste geométrico torna-se difícil ou mesmo impossível, sem a realização do alinhamento prévio.

Devido ao recobrimento limitado de cada imagem tomada com a câmera, a quantidade de nuvens geradas para o registro par a par é elevada, e a utilização de outros métodos para a determinação do alinhamento prévio se mostrou pouco eficaz. Para contornar este problema, é proposto a seguir um método de busca de regiões homólogas para efetuar o alinhamento prévio de um par de imagens. Com isto, o registro do par torna-se viável e mais rápido.

É assumido que, por se tratar de imagens consecutivas, existe uma área de superposição entre as imagens, logo a mesma região está presente nas duas nuvens de pontos, porém os pontos e sua quantidade podem ser diferentes, pois as medições são independentes. No método proposto, uma das imagens da câmera é tomada como base e a posição relativa da outra é pesquisada. Para isto, da segunda imagem são obtidos recortes contendo somente a metade da original (metades direita, esquerda, superior

e inferior). Desta forma, nuvens menores são geradas para a segunda imagem. É esperado que uma destas sub-regiões esteja completamente contida na nuvem da imagem base. A seguir, o ICP é aplicado para registrar cada sub-região à nuvem base e é escolhida como solução ideal aquela que estiver associada ao melhor ajuste geométrico. Os parâmetros encontrados são então utilizados para o alinhamento prévio da nuvem completa, permitindo assim a utilização do ICP para o registro par a par das nuvens.

3.4 Registro

Após a determinação da transformação para o alinhamento inicial, o algoritmo utilizado aplica o ICP, reduzindo iterativamente o parâmetro de tolerância de distância máxima das correspondências. Desta forma, o registro é realizado utilizando somente os pontos com correspondentes próximos nas duas nuvens. Isto reduz a possibilidade de alinhamento incorreto, principalmente no caso em que se têm poucas feições e abundância de áreas planas uniformes. Em paredes, por exemplo, a minimização do erro ao utilizar todos os pontos se daria pela sobreposição dos planos das paredes, onde a maior parte dos pontos está localizada. Porém, como as nuvens apresentam deslocamentos, esta não seria a solução correta. A Figura 4 mostra um par de nuvens antes (a) e após o processo do registro (b). Na Figura 4a as duas nuvens de pontos se encontram associadas ao sistema com origem na câmera, pelo que aparecem superpostas. A nuvem em azul é a nuvem a ser registrada e a nuvem em verde a nuvem derivada da primeira imagem. Em vermelho é indicada a metade da nuvem utilizada no alinhamento prévio. Já na Figura 4b a segunda nuvem de pontos foi deslocada para a posição correta. Note que o resultado depende da área em vermelho, os pontos do recorte da imagem usado para o referenciamento.

Para a nuvem do quadro seguinte, a transformação do quadro anterior é aplicada previamente, desta forma todos os pontos estarão no sistema de coordenadas da primeira nuvem. Isso é realizado para cada um dos quadros capturados com a câmera, referenciando, desta forma, as nuvens resultantes ao sistema da primeira nuvem.

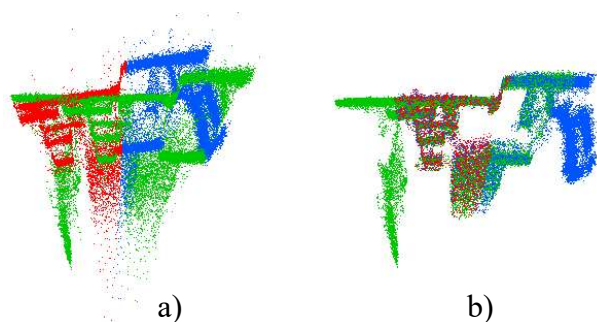


Fig. 4 – Vista em planta do registro de um par de nuvens de pontos da câmera.

3.5 Coleta da nuvem de referência

Para a avaliação da qualidade final do registro da câmera, foi utilizada uma nuvem gerada a partir do registro de nuvens obtidas com o sistema de varredura a LASER terrestre LEICA HDS 3000, com qualidade e resolução superiores às da câmera. As nuvens do sistema de varredura a LASER foram obtidas com um espaçamento médio entre os pontos de aproximadamente 1cm. Foram feitos dois levantamentos usando este equipamento e realizado o registro das nuvens obtidas com a finalidade de se gerar uma única nuvem de pontos para toda a área de estudo. Este registro foi feito em duas etapas: O método do Sample Consensus Initial Alignment foi usado para o alinhamento inicial, devido à grande quantidade de pontos em comum. Em seguida o alinhamento preciso foi feito utilizando o ICP.

Com o intuito de verificar a viabilidade da utilização da câmera de distância para o preenchimento de regiões de sombras e oclusão em nuvens de sistema de varredura a LASER scanner, uma porção da nuvem de referência foi removida para simular a ausência de pontos. Este recorte foi usado para avaliar a qualidade do produto final em regiões de oclusão.

3.6 Verificação da qualidade

A avaliação do produto foi feita comparando a nuvem obtida pela câmera de distância com a nuvem de referência obtida com a varredura a LASER. Como estes dois conjuntos se encontram em referenciais locais diferentes, é necessário efetuar o registro dos mesmos. Para isto, o método utilizado foi o Alignment Prerejective, pois a qualidade das medições dos dois equipamentos é diferente e a nuvem gerada com a câmera recobre apenas uma região da nuvem de referência, devido à remoção dos

pontos para a simulação de vazios. Este método de pré-alinhamento é mais apropriado, pois utiliza somente as melhores correspondências para determinação da transformação, encontrando-a mesmo na presença de ruídos ou no caso de diferenças de recobrimento. Finalmente, para o alinhamento preciso foi utilizado o ICP.

Uma vez que as duas nuvens se encontravam no mesmo sistema de coordenadas (o sistema de coordenadas do sistema de varredura LASER), a qualidade do registro foi avaliada por dois processos. No primeiro foi verificada a distância dos vizinhos mais próximos entre os pontos das duas nuvens. O segundo foi pela medição da distância entre os pontos de uma nuvem e o plano correspondente à mesma região na outra.

A primeira análise foi feita utilizando o software CloudCompare, pois com ele pode-se calcular a distância entre as nuvens comparando cada ponto com o seu vizinho mais próximo da nuvem registrada.

A comparação entre os pontos e os planos correspondentes foi feita no ambiente MATLAB. Algumas regiões planas foram selecionadas na nuvem de pontos e, para cada região, foi ajustado o plano correspondente. A seguir, a mesma região foi selecionada na segunda nuvem de pontos e a distância entre cada ponto e o plano foi calculada usando a equação de distância ponto-plano.

4. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos com a aplicação da metodologia descrita anteriormente para o registro das nuvens. A seguir, estes resultados são apresentados para cada etapa do trabalho, assim como a avaliação da qualidade destes.

4.1 Nuvem gerada com a câmera

Com a câmera de distância foram geradas 22 nuvens. Inicialmente cada conjunto foi submetido ao processo de redução de ruído. Após avaliar diferentes valores para o parâmetro de filtragem, verificou-se que é impossível eliminar o ruído sem causar uma grande degradação no restante da nuvem. Desta forma, optou-se por manter uma pequena quantidade de ruído de forma a preservar o restante da nuvem.

O resultado do registro destas nuvens é apresentado nas figuras 5 e 6, onde cada cor representa uma nuvem.

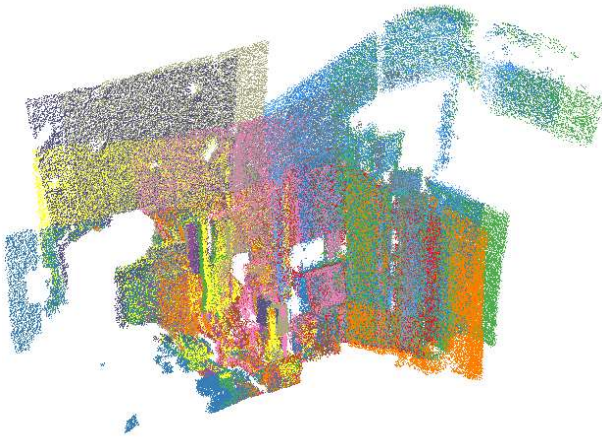


Fig. 5 - Resultado do registro das 22 nuvens da câmera de distância.



Fig. 6 - Vista em planta do registro final das 22 nuvens da Figura 5.

Pelas figuras 5 e 6 pode-se concluir que o registro foi realizado com sucesso, pois a nuvem final apresentou-se coerente em relação à geometria dos objetos levantados. Pequenas distorções presentes em cada nuvem contribuíram para que a nuvem final também apresentasse distorções, assim como um aspecto ruidoso devido ao acúmulo de ruídos também presente em cada nuvem. Houve, ainda, uma diferença de densidade entre a região central e as áreas mais próximas às bordas, sendo isso devido à diferente quantidade de nuvens utilizadas em cada região. Utilizou-se um algoritmo de voxelgrid, presente na PCL, para reduzir a densidade da nuvem, a fim de obter uma nuvem final com densidade semelhante em todas as regiões. O algoritmo utilizado segmenta a nuvem em pequenos cubos tridimensionais (voxels) e faz a redução da densidade através de uma reamostragem dos pontos contidos em cada um destes cubos.

Na Figura 6 são visíveis algumas distorções e ruídos presentes na nuvem final. Apesar da filtragem aplicada individualmente a cada nuvem, a quantidade de ruídos acumulados na

nuvem final é considerável. Nota-se que esses ruídos são principalmente devido à presença de objetos a diferentes profundidades num mesmo pixel e ao efeito de multicaminho que ocorre nas regiões côncavas, que causa o arredondamento das esquinas. Isso pode ser notado na esquina visível na parte direita da Figura 6. Na Figura 7, é mostrada uma região onde, mesmo após a filtragem, a presença de ruído ainda é grande.

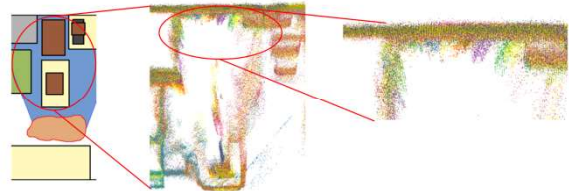


Fig. 7 - Acúmulo de ruídos devido à presença de objetos na cena.

4.2 Geração da nuvem de referência

Para gerar a nuvem de referência, foram coletadas duas nuvens utilizando o sistema de varredura a LASER e estas nuvens unidas pelo registro geométrico (Figura 8), de acordo como apresentado em 3.5, usando os algoritmos presentes na PCL. A geração da nuvem de referência foi uma etapa relativamente simples, devido à abundância de pontos em comum.

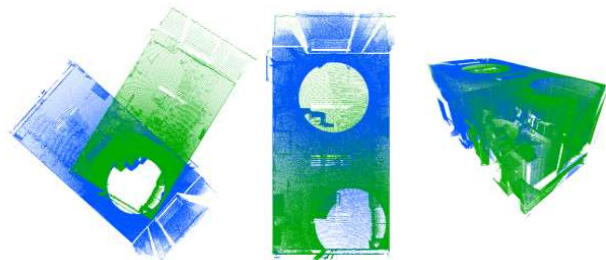


Fig. 8 - Nuvens escaneadas e registradas do sistema de varredura a LASER.

Para avaliar a eficiência do uso da câmera como ferramenta para preencher falhas no levantamento a pela varredura a LASER, foi simulada uma área sem dados, removendo pontos da nuvem de referencia. A região escolhida para a remoção consistiu de dois planos, sendo em sua maior parte pontos de parede (Figura 9). A remoção de pontos dificulta a realização do registro geométrico, pois altera a geometria da nuvem e, portanto, o reconhecimento de regiões homólogas.

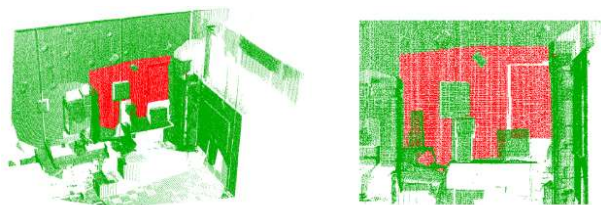


Fig. 9 - Área removida para simulação de sombras.

4.3 Registro da nuvem da câmera à de referência

Como a nuvem resultante obtida com a câmera está associada a um sistema diferente da nuvem de referência, foi necessário realizar o alinhamento prévio utilizando o Alignment Prerejective. Com base nele foi feito o alinhamento preciso. O resultado do registro obtido pelo processo é mostrado na Figura 10, onde a nuvem registrada, obtida com a câmera, é mostrada em azul e a nuvem de referência do sistema de varredura a LASER em verde.

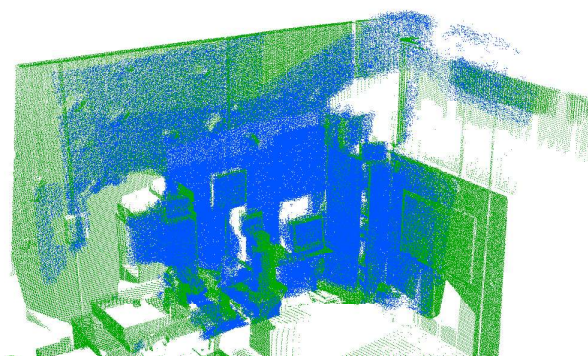


Fig. 10 - Resultado do registro entre a nuvem da câmera e do LASER scanner.

Pela Figura 10, pode-se notar que o registro foi bem sucedido, pois é possível discernir feições e objetos presentes no local, como a caixa de energia e o monitor na parte central da figura, o que indica que as nuvens estão alinhadas corretamente. Isso pode ser confirmado na Figura 11, onde se pode, também, visualizar a coincidência das duas nuvens, evidenciada pelo alinhamento correto das regiões de parede.

4.4 Avaliação da qualidade

Com a finalidade de avaliar a similaridade entre as duas nuvens, foi calculada a diferença

ponto a ponto entre a nuvem da câmera registrada e a nuvem de referência. Na Figura 12 é mostrada a diferença obtida para cada ponto, codificada em cores. As áreas em azul são as que apresentam menores diferenças (em torno de 1 cm) e as vermelhas mostram as maiores diferenças.

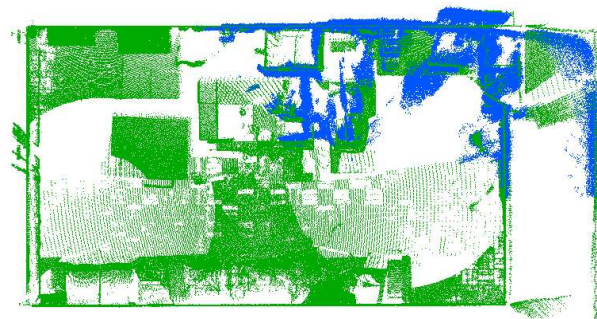


Fig. 11 - Vista em planta do resultado do registro.

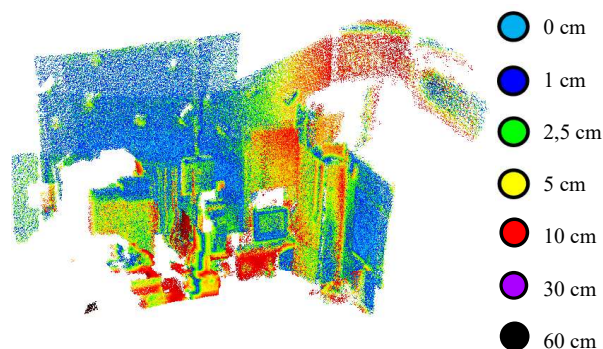


Fig. 12 - Nuvem da câmera, colorida de acordo com a diferença para a nuvem de referência.

Pela Figura 12, pode-se notar que para as regiões planas e de paredes, as diferenças são na ordem do centímetro. Nas regiões de bordas nota-se uma degradação de 2-5 cm (representadas pelas cores verde e amarela). Nas regiões com maiores distorções e ruído as diferenças aumentam significativamente (cores vermelho, roxo e preto), chegando a variar entre 10-60 cm. Porém deve-se considerar que os valores extremamente grandes podem ser provenientes de ruído não filtrado.

Para avaliar essa diferença entre as nuvens os dados foram separados em faixas, conforme mostrado no Quadro 1. Pode-se notar que a maior parte dos pontos apresenta diferenças entre 0 e 3 cm (55,6%). Pode-se observar ainda que 73,4% dos pontos apresentam diferenças abaixo de 5 cm.

Quadro 1: Quantidade de pontos de acordo com as diferenças

	<1cm	≥1cm <3cm	≥3cm <5cm	≥5cm <10cm	≥10cm <30cm	≥30cm
Quant. de pontos	105831	173927	89555	91438	39942	2449
Razão do Total (%)	21,03	34,57	17,80	18,17	7,94	0,49
Acumulado (%)	21,03	55,60	73,40	91,57	99,51	100

A partir destas distâncias, calculando-se a diferença média e o desvio padrão respectivamente, obtém-se os valores de 4,2 cm e 5,1 cm. Considerando estes valores a qualidade geral a ser esperada seria em torno de 5 cm. Porém, em regiões com ausência de distorções e ruídos a qualidade a ser esperada é melhor do que 5 cm, pois notou-se que a diferença observada depende muito de fatores como o material dos objetos.

Para analisar a influencia do material das superfícies e a geometria dos objetos na qualidade do registro a segunda parte do experimento consiste em analisar regiões selecionadas com materiais diferentes. Para isto, regiões planas foram selecionadas na nuvem de pontos de referencia e calculou-se a distância ponto-plano para os pontos da mesma região na nuvem de pontos obtida com a câmera. As regiões selecionadas são indicadas na Figura 13.

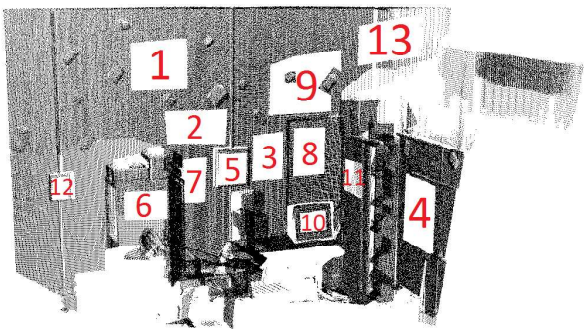


Fig. 13 - Regiões utilizadas para a análise ponto a plano.

As regiões 1, 2, 3 e 4 são regiões da parede, sem a presença de outros objetos em seu entorno, e não apresentaram distorções ou ruído. A análise em relação ao plano é mostrada no Quadro 2. Nota-se que o registro obteve um bom resultado, com valores médios na ordem de 1 a 1,5 cm. A região 1 é formada por uma menor quantidade

de nuvens de pontos registradas e apresenta, portanto, menor acúmulo de ruído. Isso contribui para o resultado encontrado ter sido melhor para esta região.

Quadro 2: Erros e desvios-padrão para regiões 1, 2, 3 e 4

	1	2	3	4	Total
Erro médio (m)	0,0096	0,0137	0,0159	0,0164	0,0148
Desvio-padrão (m)	0,0070	0,0116	0,0130	0,0129	0,0120
Nº de pontos	5578	9476	9803	17263	42120

No Quadro 3, são apresentados os valores encontrados para as regiões 5 e 6, compostas por superfícies metálicas pouco reflexivas. Estas são regiões com moderada quantidade de objetos ao seu redor e, por se tratarem de planos pertencentes a objetos e não a paredes, podem ter medições afetadas pelos desníveis apresentados nas bordas. Nota-se valores maiores para as diferenças em relação às regiões de paredes, com valor próximo a 2,5 cm para a região 6.

Quadro 3: Erros e desvios-padrão para regiões 5 e 6

	5	6	Total
Erro médio (m)	0,0194	0,0243	0,0223
Desvio-padrão (m)	0,0155	0,0184	0,0173
Nº de pontos	7491	10390	17881

Outro grupo de regiões selecionadas foram as regiões 7, 8 e 9 por serem regiões que apresentaram distorções moderadas. Os valores encontrados são apresentados no Quadro 4. A região 7 consiste de uma região de parede, porém apresentou um resultado degradado devido à presença de um objeto situado diretamente a sua frente. A presença destes objetos causa ruído

em cada uma das nuvens geradas com a câmera, afetando o erro. As regiões 8 e 9 apresentaram diferenças em relação aos seus respectivos planos de referência devido a uma leve curvatura apresentada ao longo dos registros das nuvens da câmera. A região 8 sofre distorções, ainda, por ser próximo a um canto, que contribuiu para aumentar o erro.

Quadro 4: Erros e desvios-padrão para as regiões 7, 8 e 9

	7	8	9	Total
Erro médio (m)	0,0325	0,0418	0,0321	0,0358
Desvio-padrão (m)	0,0197	0,0256	0,0224	0,0228
Nº de pontos	10649	11889	9661	32199

O Quadro 5 apresenta os valores encontrados para as regiões 10 e 11, que foram selecionadas por se tratarem de regiões compostas de materiais não favoráveis para a utilização da câmera, onde se notou uma maior presença de ruídos.

Quadro 5: Erros e desvios-padrão para as regiões 10 e 11

	10	11	Total
Erro médio (m)	0,0317	0,0374	0,0353
Desvio-padrão (m)	0,0310	0,0315	0,0313
Nº de pontos	5522	9038	14560

Pode-se perceber que os valores para as diferenças médias foram similares aos encontrados para as regiões 7, 8 e 9, porém os valores para os desvios-padrão foram maiores, indicando uma maior dispersão dos pontos. A região 10 se tratava de um monitor de raios catódicos que afetou a qualidade da medição com a câmera e a região 11 uma região metálica, semelhante às regiões 5 e 6, porém seu resultado foi significativamente pior. Isso ocorreu devido ao material ser um metal mais reflexivo do que os das regiões 5 e 6, resultando em uma maior presença de ruídos nessa região.

As regiões 12 e 13 foram regiões que foram severamente degradadas pela presença de distorções e foram selecionadas para quantificar a influência destas. Os valores destas regiões são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6: Erros e desvios-padrão para as regiões 12 e 13

	12	13	Total
Erro médio (m)	0,0628	0,1083	0,1043
Desvio-padrão (m)	0,0298	0,0354	0,0350
Nº de pontos	324	3379	3703

A região 12, apesar de ser uma região resultante de apenas uma nuvem, pois foi o local onde foi iniciado o levantamento com a câmera, apresentou um valor alto para o erro, isso ocorreu devido à distorção causada pela presença de outros objetos quase diretamente a sua frente. A região 13 por sua vez, apresentou a pior qualidade com erro em torno de 10 cm. Essa diferença é visível na Figura 11, mostrada anteriormente. A maior influência para essa diferença é o arredondamento do canto da nuvem gerada com a câmera. Além disso, deve-se considerar que esta região do levantamento é separada da sala por vidro translúcido, que afeta também a qualidade dos resultados.

As regiões com grande quantidade de ruído e distorções são facilmente identificáveis e consistem, normalmente, de uma pequena porção da totalidade dos pontos situados em regiões específicas. Desta forma pode-se assumir que esses pontos podem ser removidos ou capturas adicionais podem ser feitas para minimizar a sua presença, o que pode ser alcançado por um bom planejamento para o levantamento ou remoção manual dos ruídos. Desta forma, no Quadro 7 são apresentados o erro médio e desvio-padrão, sem considerar as regiões com grande quantidade de erros.

Quadro 7: Erros e desvios-padrão para as regiões 1 a 11

	1-4	5-6	7-9	10-11	Total
Erro médio (m)	0,0148	0,0223	0,0358	0,0353	0,0252
Desvio-padrão (m)	0,0120	0,0173	0,0228	0,0313	0,0199
Nº de pontos	42120	17881	32199	14560	106760

Deste quadro pode-se observar que a qualidade média esperada seja em torno de 3 cm para regiões favoráveis na presença de áreas com distorções moderadas.

Como grande parte das diferenças é proveniente de erros sistemáticos do sensor, devem ser analisadas regiões menos influenciadas por este tipo de erro para avaliar a qualidade esperada do registro. Por isso, no Quadro 8, são consideradas somente as regiões 1 a 6, aquelas com menor influência de erros sistemáticos. O Quadro 8 indica o erro médio para as regiões com pouca presença de ruído e distorções. Nessas condições, o erro médio a ser esperada é de 2 cm. Sabendo-se que mesmo nessas regiões as nuvens da câmera não são completamente isentas de erros, pode-se afirmar que este é um resultado satisfatório para o processo de registro.

Quadro 8: Erros e desvios-padrão para regiões 1 a 6

	1-4	5-6	Total
Erro médio (m)	0,0148	0,0223	0,0170
Desvio-padrão (m)	0,0120	0,0173	0,0138
Nº de pontos	42120	17881	60001

Pelos valores apresentados, pode-se verificar que os erros calculados ponto a ponto são coerentes às distâncias obtidas ponto a ponto.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi realizado com o intuito de verificar a qualidade de uma nuvem de pontos da câmera de distância gerada através de um processo de registro geométrico e o resultado da sua integração a uma nuvem obtida com sistema de varredura a LASER terrestre. Baseando-se nos resultados e análises apresentados anteriormente, algumas conclusões podem ser feitas.

O levantamento com a câmera foi realizado com sucesso utilizando a metodologia adotada. Porém, devido à presença de objetos no local com grandes diferenças de profundidade para o fundo da cena, notou-se a presença de muitos pixels flutuantes e ruído, causados pelo retroespalhamento. Com a filtragem, estes ruídos foram bastante reduzidos e o registro alcançou resultados adequados. Porém, mesmo com a filtragem, o acúmulo de vestígios de cada nuvem foi perceptível na nuvem registrada resultante.

Em relação à qualidade final alcançada pelo processo de registro, pode-se afirmar que a mesma depende da superfície e posição relativa dos objetos. As regiões planas foram os locais onde foi possível alcançar os melhores

resultados. Por outro lado, a qualidade do registro é altamente afetada pela presença de diferentes objetos numa mesma tomada ou o material da superfície. Apesar disso, os resultados obtidos mostram que, utilizando-se a metodologia apresentada, podem-se esperar erros médios de até 2 cm, dependendo da cena a ser mensurada.

O método proposto para o alinhamento prévio se mostrou eficiente, pois o registro das nuvens convergiu adequadamente em quase todos os casos, sendo que nos casos em que não obteve convergência eram, em sua maioria, casos de tomadas com ausência de feições e detalhes. Além disso, o método se mostrou eficaz, os resultados foram obtidos rapidamente, e por também utilizar o ICP para encontrar o alinhamento, ele foi facilmente integrado ao processo de registro.

Pode-se concluir que a metodologia descrita é eficiente e a câmera de distância pode ser utilizada, também, para realizar levantamentos tridimensionais ou preencher vazios de levantamentos com LASER scanner, por exemplo. Deve-se considerar, porém, a diferença da qualidade dos dados obtidos com este tipo de sensor, pois a diferença de qualidade nos dados dificulta o registro e afeta diretamente a qualidade do resultado mesmo que este seja realizado isento de erros.

Ainda, o registro das diversas nuvens de pontos da câmera resultou em densidades diferentes ao longo do espaço: uma densidade alta nas regiões com sobreposição de diversas imagens e baixa nas regiões formadas por poucas. A busca de uma distribuição mais adequada da densidade para toda a nuvem é recomendada para verificar como tal diferença afeta o registro geométrico, além de melhorar a avaliação da qualidade dos resultados.

A presença de ruídos e distorções nas nuvens geradas com a câmera de distância foi significativa durante a pesquisa. Existem outros trabalhos na literatura que tratam da modelagem destes erros (JAMTSO & LICHTI (2010); KAREL *et al.* (2010)), os quais se recomenda pesquisar.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa fornecido no período da realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Vol. 14, n. 2, 1992, p. 239-256.
- Biber, P.; Straßer, W. The Normal Distributions Transform: a New Approach to Laser Scan Matching. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)**, vol.3, Las Vegas, 2003, p. 2743-2748
- BRUNNSTRÖM, K.; STODDART, A. J. Genetic Algorithms for Free-Form Surface Matching. **Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition**, vol.4, Vienna, 1996, p. 689-693.
- BUCH, A. G.; KRAFT, D.; KAMARAINEN, J.-K.; PERERSEN, H.G.; KRUGER, N., Pose Estimation Using Local Structure-Specific Shape and Appearance Context, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, Karlsruhe, 2013, p. 2080-2087.
- CHEN, C. S.; HUNG, Y. P.; CHENG, J. B. RANSAC-Based DARCES: a New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 21, no. 11, 1999, p. 1229-1234.
- CHUA, C. S.; JARVIS, R. Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition. **International Journal of Computer Vision**, vol. 25, n. 1, 1997, p. 63-85.
- CHUNG, D. H.; YUN, I. D.; LEE, S. U. Registration of Multiple-Range Views Using the Reverse-Calibration Technique. **Pattern Recognition**, vol. 31, n. 4, 1998, p. 457-464.
- JAMTSHO, S.; LICHTI, D. D. Modelling Scattering Distortion in 3D Range Camera. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Vol. 18, part 5, Newcastle upon Tyne, 2010. p. 299-304.
- KAREL, W.; GHUFFARB, S.; PFEIFERB, N. Quantifying The Distortion Of Distance Observations Caused By Scattering In Time-of-flight Range Cameras. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. 18, part 5, Newcastle upon Tyne, 2010. p. 316-321.
- LANGE, R. **3D Time-of-Flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology**. 205 p. Tese (Department of Electrical Engineering and Computer Science at University of Siegen for the degree of Doctor of Technical Sciences). University of Siegen, Alemanha, 2000.
- OLIVEIRA, A. A. A. **Modelagem Tridimensional de Superfícies Utilizando Imagem TOF: Estudo com a Câmara PMD CamCube 2.0**. 127 p. Dissertação (mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- QI, X.; LICHTI, D. D.; EL-BADRY, M.; CHAN, T. O.; EL-HALAWANY, S. I.; LAHAMY, H.; STEWARD, J. Structural Dynamic Deflection Measurement with Range Cameras. **The Photogrammetric Record**, vol. 29, n.1, 2014, p. 89-107.
- RUSU, R. B. **Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments**. 260 p. Tese (Department of computer science at the Technical University of Munich for the degree of Doctor of Natural Sciences). Technischen Universität München, Alemanha, 2009.