

REGISTRO E ALINHAMENTO DE IMAGENS DE PROFUNDIDADE OBTIDAS COM DIGITALIZADOR PARA O MODELAMENTO DE OBJETOS COM ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ALGORITMO ICP

Jose Alejandro Bonilla Naranjo, alejandrob@unb.br
José Mauricio Santos Torres da Motta, jmmotta@unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Automação e Controle (GRACO)

Resumo: Este artigo apresenta resultados experimentais para registro e alinhamento de imagens de profundidade (nuvens de pontos) com o uso de duas versões do algoritmo ICP (Iterative Closest Point), para realizar o modelamento de objetos. O modelamento de objetos foi feito implementando o algoritmo ICP em uma técnica de variação angular controlada de vistas para melhorar o resultado do modelo digitalizado de um rosto humano. As duas versões do algoritmo ICP tem modificações na etapa de busca de correspondências de pontos. A primeira versão utilizada é chamada ICP Força Bruta, a qual encontra os pontos correspondentes com base na menor distância Euclidiana entre os supostos pontos correspondentes das duas nuvens de pontos. A segunda versão é chamada ICP Kd-Tree, a qual acelera a busca dos pontos correspondentes, armazenando os pontos de forma hierárquica, entre as nuvens de pontos de estudo. Foram realizados 3 testes para avaliar a convergência dos algoritmos utilizados em função do número de iterações. Finalmente, foi feita uma comparação da velocidade de convergência entre as duas versões do algoritmo ICP implementadas.

Palavras-chave: ICP, registro de imagens, modelamento de objetos, kd tree, força bruta

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas para reconstrução 3D para modelagem de objetos baseada em visão computacional fornece uma larga possibilidade de aplicações tecnológicas em diversas áreas de engenharia. Atualmente, intensa pesquisa tem sido realizada com foco no aprimoramento de técnicas de registro de imagens, de forma a tornar o processo mais confiável e robusto (Akca, 2005).

O ICP (*Iterative Closest Point*) é um algoritmo iterativo para registro de imagens e, como seu nome indica, estabelece uma relação entre as distâncias entre pontos que compõem as imagens onde se realiza o registro (Besl e Mckay, 1992). Diversos trabalhos já foram publicados para o registro de imagens 3-D a partir de nuvens de pontos, utilizando-se de técnicas como Rotulação Estocástica Hierárquica (Liu, et al. 2008), Transformada de Hough (Qu., et al, 2011), Quaternions (Hua, et al. 2013), SVD (Pan, et al. 2011), etc., em conjunto com algoritmos iterativos baseados em pontos ou planos ou em linhas (Horn, 1987). Somente após o desenvolvimento de algoritmos robustos foram realizados avanços importantes dentro das técnicas da visão computacional para resolver o problema do registro e reconhecimento de objetos.

Melhorias sobre o ICP são voltadas essencialmente para diminuir o custo computacional do algoritmo. Os métodos para aperfeiçoar o algoritmo ICP podem ser separados em 3 tipos: 1) Redução do número de iterações. 2) Redução do número de dados (*data points*). 3) Aceleração da busca dos pontos mais próximos.

O algoritmo ICP atua em diversas etapas para encontrar os pontos correspondentes mais próximos entre duas imagens formadas por nuvens de pontos (Rusinkiewicz e Levoy, 2001). As nuvens de pontos são um conjunto de coordenadas que representam a superfície externa de um objeto real dentro de um sistema de coordenadas tridimensional, comumente obtidas a partir de sensores 3D. Os pontos se identificam, em geral, como coordenadas x, y, z, e representam a superfície de um objeto (Trucco, e Verri, 1998). Geralmente, as diferenças entre os diversos tipos de algoritmos ICP (versões modificadas) consistem em algumas das etapas do seu funcionamento, com objetivo de melhorar seu desempenho.

Neste artigo, foram implementados dois tipos de algoritmos ICP, com as etapas de seleção, correspondência, rejeição e minimização. A diferença entre os dois está em uma modificação na etapa de correspondência do algoritmo. O primeiro algoritmo implementado é um algoritmo ICP convencional (método de busca *Força Bruta*) e o segundo é uma versão modificada que utiliza um algoritmo de busca do tipo *Kd-Tree* (Bentley, 1980), o que reduz consideravelmente o tempo de processamento.

Cada um dos algoritmos implementados é utilizado para realizar o modelamento de objetos, mediante uma técnica de captura de imagens que consiste em variação de ângulos de vista de forma controlada, com o objetivo de melhorar a automatização e a precisão no modelamento.

2. REGISTRO DE IMAGENS

O registro de imagens é o processo de determinar a matriz de transformação entre duas imagens do mesmo objeto em diferentes sistemas de coordenadas, aplicando várias transformações sobre uma das imagens e comparando o resultado sobre a imagem padrão sobreposta, até alcançar o alinhamento entre as duas imagens. O registro é feito iterativamente, com aplicações sucessivas de várias transformações até que a distância entre os pontos atinja um limiar máximo, permitindo assim o alinhamento entre conjuntos de dados ou imagens espacialmente (Gu, 1997), como indica a Fig. 1.

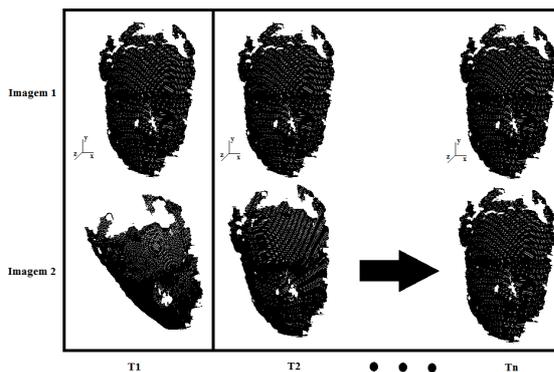


Figura 1. Aplicação de várias transformações (T_1, T_2, \dots, T_n) até alcançar o alinhamento entre as duas imagens.

As imagens utilizadas neste artigo, para o estudo comparativo, são nuvens de pontos obtidas por um digitalizador a laser. A imagem alvo será denominada de imagem *Base* e a de referência será denominada de imagem *Modelo*. No processo, aplica-se sobre elas uma transformação de corpo rígido, modificando suas coordenadas até o alinhamento entre as nuvens de pontos.

3. O ALGORITMO ICP

O algoritmo ICP converge monotonicamente para o mínimo local mais próximo de uma função de custo para encontrar uma transformação rígida adequada entre duas imagens de profundidade (Chen e Medioni, 1992). Assim, esse método refina iterativamente uma transformação inicial, procurando minimizar a função de custo, medindo a similaridade (distância Euclidiana) entre duas nuvens de pontos. As iterações terminam quando um critério de parada é atingido.

4. DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Os algoritmos implementados têm várias etapas importantes para desenvolver a sua função. A primeira etapa de correspondência procura encontrar os pontos correspondentes entre duas nuvens de pontos, identificando que ponto de uma nuvem de pontos corresponde a outro ponto da outra nuvem de pontos.

Os dois algoritmos ICP implementados neste artigo utilizaram dois conjuntos de dados (nuvens de pontos) e uma modificação na sua etapa de correspondência. Os dois algoritmos foram implementados no ambiente MATLAB®.

4.1 ICP Força Bruta

O primeiro algoritmo ICP implementado utilizou o algoritmo de busca *Força Bruta*, no qual mediram-se as distâncias entre a nuvem de pontos *Base* e a nuvem de pontos *Modelo* para cada um dos pontos, para posteriormente identificar a menor distância entre eles e assim encontrar os pontos correspondentes, Fig. 2.

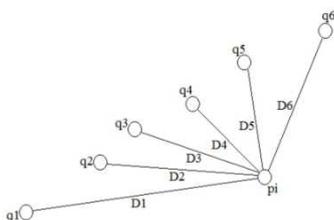


Figura 2. Distâncias (D_i) entre cada ponto da nuvem de pontos base (p_i) e a nuvem de pontos modelo (q_i).

Este tipo de algoritmo tem um custo computacional mais alto, já que o número de cálculos computacionais realizados na sua etapa de correspondência é maior.

4.2 ICP *Kd-Tree*

O segundo algoritmo ICP implementado utiliza o outro algoritmo de busca, *Kd-Tree* (Bruce F. Naylor, 1993), o qual cria uma estrutura em forma de árvore que permite organizar todos os pontos de uma nuvem de pontos através de um particionamento espacial binário (*Binary Space Partitioning*) ou BSP (Fuchs, et al., 1983), estabelecendo uma relação entre a distância de cada um dos pontos da nuvem. Assim, a árvore da nuvem de pontos *Modelo* foi construída utilizando o algoritmo *Kd-Tree*, organizando os pontos segundo a sua distância.

Uma vez organizados os pontos dentro da árvore, cada ponto p da imagem *Modelo* é comparado com um ponto da imagem *Base*, seguindo uma ramificação da árvore até chegar a uma folha (que é o último elemento de cada ramificação). Começando pela raiz, são comparadas as distâncias entre o ponto p e cada um dos pontos q_i da ramificação. O ponto com o menor valor de distância é considerado o ponto correspondente.

Este algoritmo permite uma economia nos cálculos, já que não será feita uma comparação entre todos os pontos como é feito no algoritmo *Força Bruta*, reduzindo consideravelmente o tempo na etapa de correspondência do algoritmo ICP.

4.3 Etapas do ICP

Os dois algoritmos do ICP construídos (*Força Bruta* e *Kd-Tree*) calculam as distâncias entre os pontos das duas imagens e, assim, identificam os pontos correspondentes. Uma vez determinados estes pontos, com qualquer um dos algoritmos, é aplicada uma métrica de erro às nuvens de pontos com objetivo de minimizar a função de custo ponto a ponto, na forma de:

$$e = \sum_{i=1}^N \left\| R p_i + \vec{T} - q_i \right\|^2 \quad (1)$$

onde p_i e q_i são pontos nas duas nuvens, respectivamente. Inicialmente, são calculados os centróides das nuvens de pontos *Base* e *Modelo*, utilizando todos os pontos da nuvem de pontos *Base* (n_b) e todos os pontos da nuvem de pontos *Modelo* (n_m), através de:

$$\bar{p} = \frac{1}{n_b} \sum p \quad , \quad \bar{q} = \frac{1}{n_m} \sum q \quad (2)$$

No próximo passo, é calculada a distância p'_i e q'_i de cada ponto das nuvens, respectivamente, ao centróide de cada nuvem, através de:

$$p'_i = p_i - \bar{p} \quad , \quad q'_i = q_i - \bar{q} \quad (3)$$

Utilizando as Eqs. (1), (2) e (3), obtém-se:

$$e = \sum_{i=1}^N \left\| R(p'_i + \bar{p})\vec{T} - (q'_i + \bar{q}) \right\|^2 \quad (4)$$

e agrupando termos:

$$e = \sum_{i=1}^N \left\| R p'_i - q'_i (R\bar{p} + \vec{T} - \bar{q}) \right\|^2 \quad (5)$$

No processo de minimização da função de custo, o vetor de translação deve ajustar o centroide da nuvem de pontos *Base* até o centróide da nuvem de pontos *Modelo*, como na equação:

$$\vec{T} = \bar{q} - R\bar{p} \quad (6)$$

Substituindo a Eq. (6) na Eq. (5) obtém-se:

$$e = \sum_{i=1}^N \|p'_i\|^2 - 2tr(\sum_{i=1}^N p'_i q'_i{}^T) + \sum_{i=1}^N \|q'_i\|^2 \quad (7)$$

de tal forma que, para minimizar e , pode-se maximizar o traço da matriz RZ , onde Z é:

$$Z = \sum_{i=1}^N p'_i q'_i{}^T \quad (8)$$

O traço de RZ pode ser expresso como:

$$tr(RZ) = \sum_{i=1}^N r_i \bullet c_i \leq \sum_{i=1}^N \|r_i\| \|c_i\| \quad (9)$$

onde r_i e c_i são as colunas de Z e as linhas de R , respectivamente. Utilizando a desigualdade de Cauchy-Schwarz, pode-se dizer que:

$$tr(RZ) = tr(\sqrt{Z^T Z}) \quad (10)$$

Finalmente, aplica-se a *SVD* (Decomposição dos Valores Singulares) sobre a Eq. (10), obtendo-se:

$$tr(VU^T U \Sigma V^T) = tr(V \Sigma V^{-1}) = tr(\sqrt{V \Sigma V^{-1}}) = tr(\sqrt{Z^T Z}) \quad (11)$$

onde a rotação pode ser encontrada ao resolver:

$$R = VU^T \quad (12)$$

Com esse valor do vetor de rotação (Eq. 11), é maximizado o traço da matriz RZ (Eq. 9), que por sua vez permite minimizar a métrica de erro na Eq. 7, o que reduz a distância entre os pontos correspondentes das duas imagens em cada iteração.

5. CAPTURA DAS IMAGENS DE PROFUNDIDADE

Duas imagens foram utilizadas para fazer o registro, com o uso das caixas da Fig. 3. Na primeira imagem, as caixas foram empilhadas sobre outro objeto, como mostra a Fig. 3 (a). Na segunda, as caixas foram empilhadas sobre uma mesa como mostra a Fig. 3 (b).

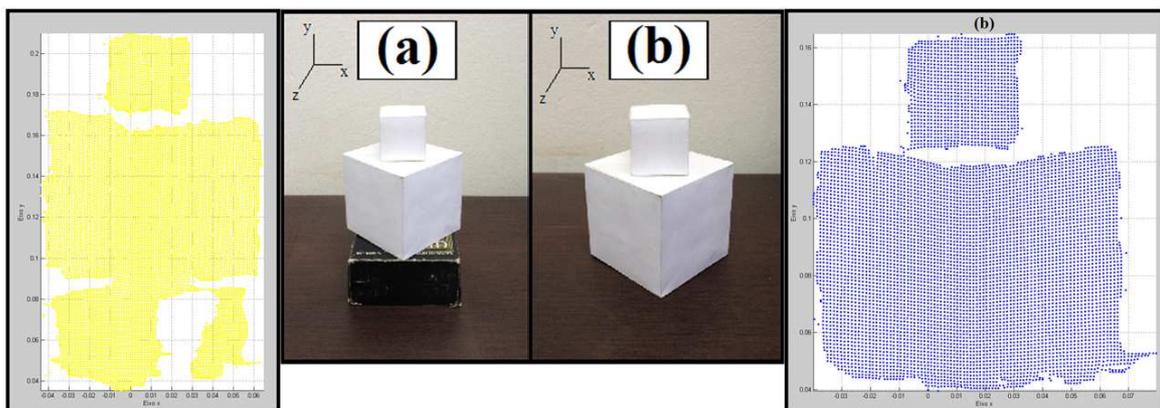


Figura 3. Par de imagens utilizadas para o registro. (a) Objeto 1, representado com a cor amarela. (b) Objeto 2, representado com a cor azul.

A captura das imagens de profundidade foi executada utilizando o sensor *Kinetic*® (Microsoft). Esse dispositivo utiliza um digitalizador de luz estruturada, e serve como sensor de movimento. Neste experimento, entretanto, foi utilizado apenas para a obtenção de nuvens de pontos.

6. SIMULAÇÃO E IMAGENS OBTIDAS

Os testes experimentais sobre as nuvens de pontos, utilizando os algoritmos implementados foram realizados da seguinte maneira:

- I. Teste 1: Renderização com o algoritmo ICP *Força Bruta*.
- II. Teste 2: Renderização com o algoritmo ICP modificado, *Kd-Tree*.
- III. Teste 3: Gráficos do erro (RMS) *versus* o tempo.

6.1 Resultado do Teste 1

A Fig. 4 mostra a vista frontal e lateral do registro obtido pelo algoritmo ICP *Força Bruta*.

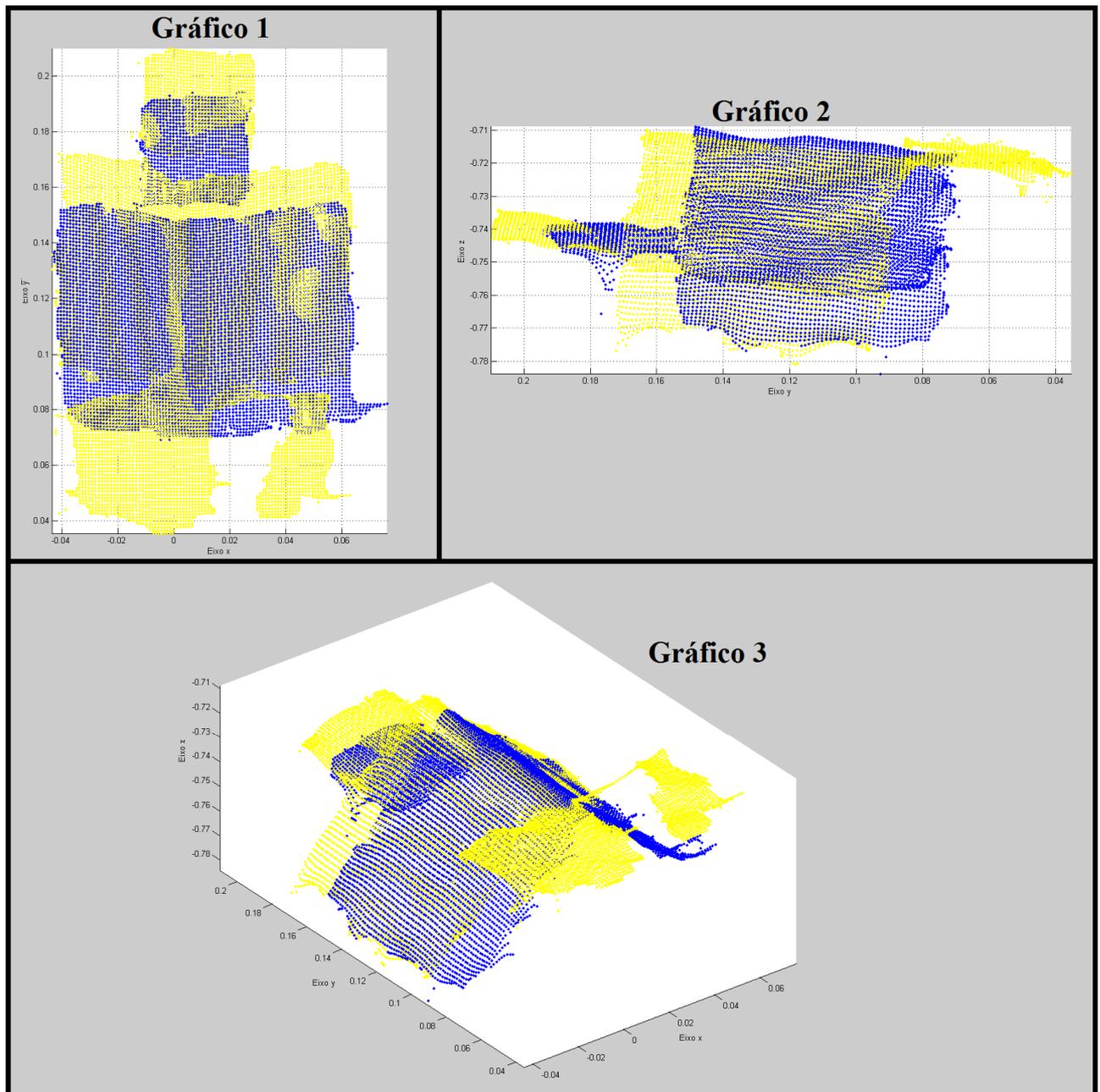


Figura 4. Vista frontal das imagens e do registro obtido pelo algoritmo ICP *Força Bruta* com 10 iterações. Gráfico 1, vista frontal do registro entre os dois objetos. Gráfico 2, vista lateral do registro entre os dois objetos. Gráfico 3, imagem perspectiva do registro.

6.2 Resultado do Teste 2

A Fig. 5 mostra a vista frontal e lateral do registro obtido pelo algoritmo ICP *Kd-tree*.

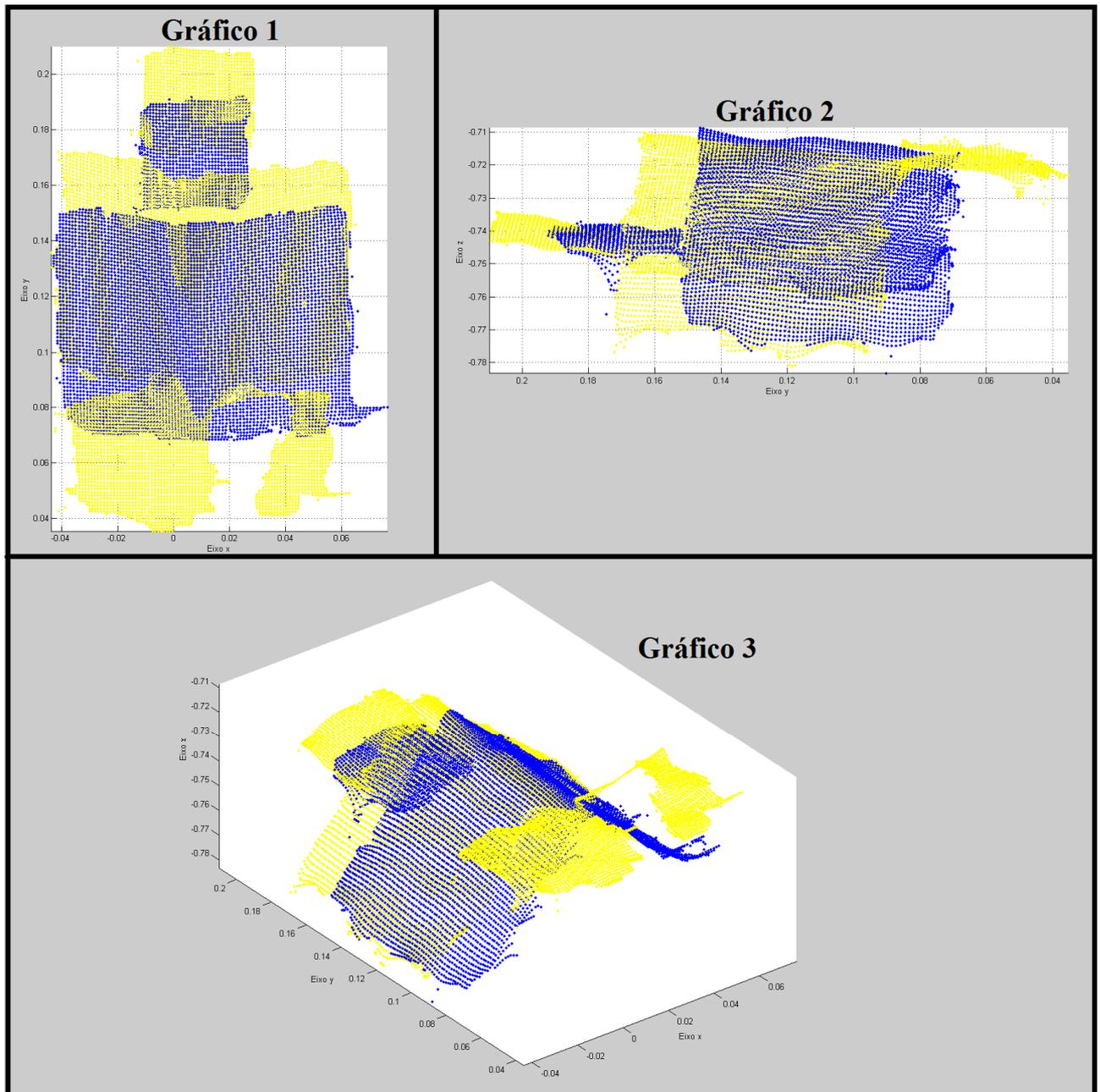


Figura 5. Vista frontal das imagens e do registro obtido pelo algoritmo ICP *Kd-Tree* com 10 iterações. Gráfico 1, vista frontal do registro entre os dois objetos. Gráfico 2, vista lateral do registro entre os dois objetos. Gráfico 3, imagem perspectiva do registro.

6.3 Resultado do Teste 3

O erro quadrático médio foi calculado para os algoritmos *Força Bruta* e *Kd-Tree*, com diferentes números de iterações, como mostra a Fig. 6.

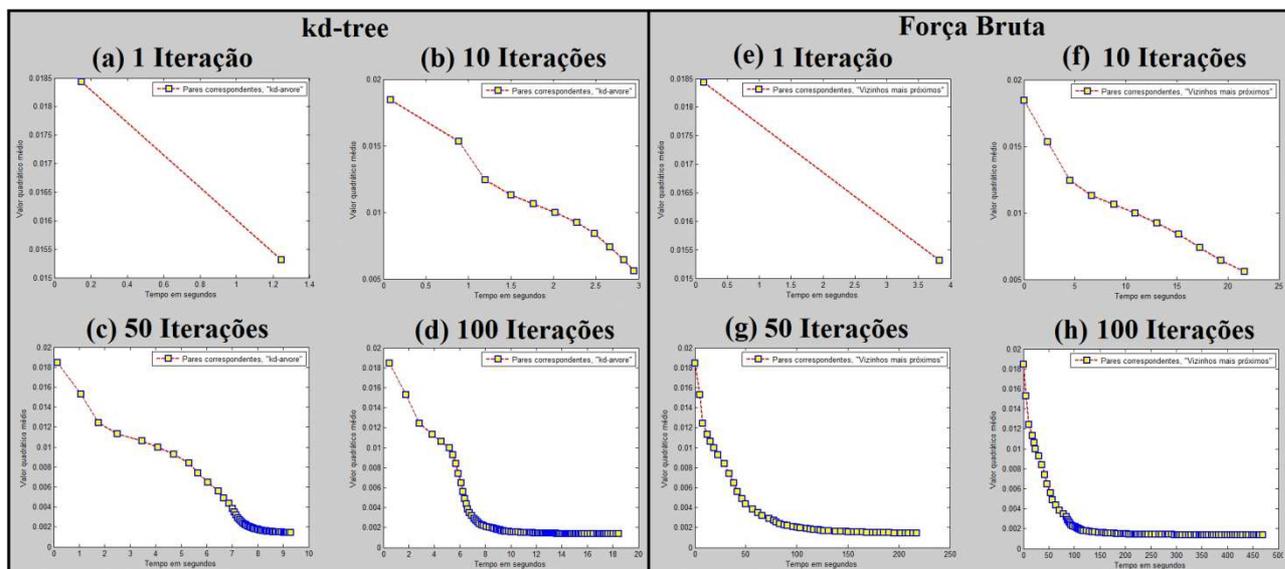


Figura 6. Erro quadrático médio obtido utilizando o algoritmo ICP com (a) 1 iteração com *Força Bruta* (b) 10 iterações com *Força Bruta* (c) 50 iterações com *Força Bruta* (d) 100 iterações com *Força Bruta* (e) 1 iteração com *Kd-Tree* (f) 10 iterações com *Kd-Tree* (g) 50 iterações com *Kd-Tree* (h) 100 iterações com *Kd-Tree*.

7. MODELAMENTO DE IMAGENS

Outros experimentos realizados consistem na reconstrução de objetos, aproveitando as propriedades dos algoritmos ICP. O ambiente de trabalho é mostrado na Fig. 7.



Figura 7. Imagem do ambiente implementado para o modelamento de objetos, mesa e cadeira.

O objetivo do modelamento foi a digitalização do rosto e cabeça de uma pessoa. O procedimento consistiu em colocar a pessoa a ser digitalizada na cadeira móvel, e tomar as imagens a cada um dos ângulos de interesse, utilizando-se de um procedimento com variações de ângulos de visão de forma controlada, limitando a intervenção humana o que aumenta a automatização na digitalização de um rosto humano.

8. USO DO ICP EM IMAGENS COM VARIAÇÕES CONTROLADAS DE ÂNGULOS NO MODELAMENTO DE OBJETOS

Neste trabalho desenvolveu-se uma técnica de captura de imagens de profundidade que consiste em obter imagens de profundidade de diversos ângulos conhecidos de um objeto, armazenando-os associados a cada uma das imagens digitalizadas. No experimento foram tomadas oito vistas em diferentes posições (Fig. 8 (a)). Posteriormente, determinou-se uma transformação inicial para o sistema, nas diferentes posições das vistas, para construir o modelo do objeto. Para aumentar a precisão da reconstrução, o alinhamento foi realizado modificando os parâmetros extrínsecos (rotação e translação) para as imagens fixas (vistas 1, 3, 5 e 7 na Fig. 8 (a)).

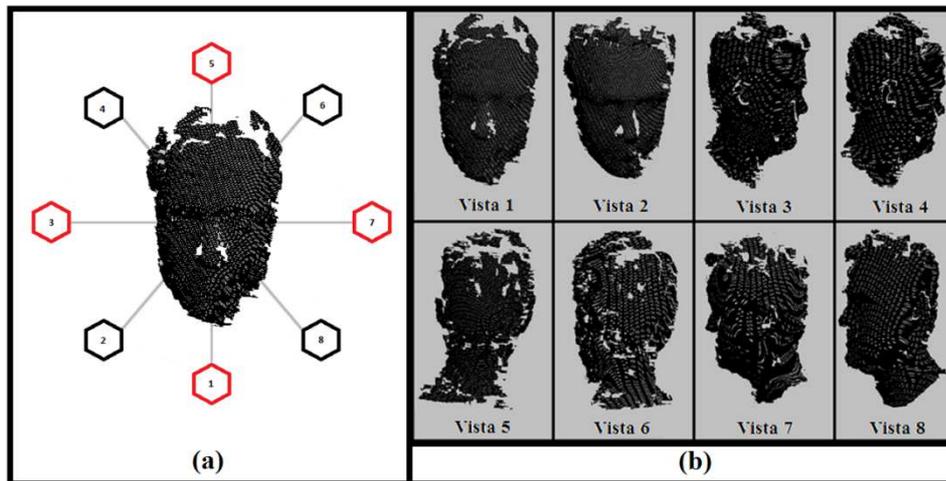


Figura 8. (a) Posição das vistas obtidas com a câmera (digitalizador) ao redor do objeto. (b) Todas as vistas utilizadas para fazer o modelamento do objeto.

9. RESULTADO DO MODELAMENTO

A modelagem obtida, com a técnica, é mostrada na Fig. 9.

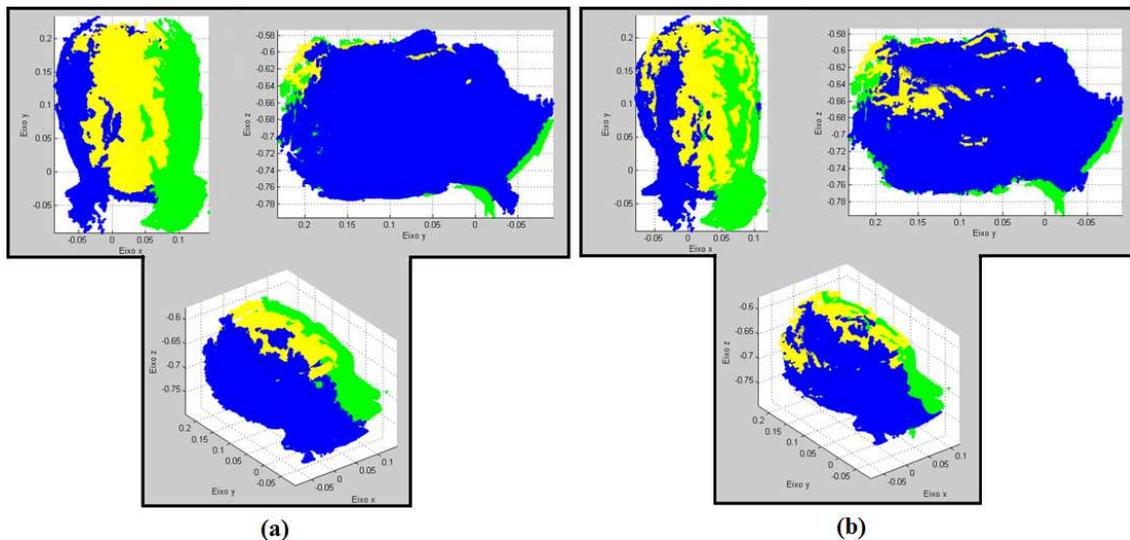


Figura 9. Modelamento do objeto com o algoritmo ICP *Kd-Tree* (a) com 10 iterações e (b) com 100 iterações. As cores representam as vistas laterais, frontal e posterior do rosto respectivamente.

10. VELOCIDADE DE CONVERGÊNCIA DOS ALGORITMOS ICP IMPLEMENTADOS

Ao realizar os testes, verificou-se que o tempo de convergência utilizando o algoritmo *Kd-Tree* é muito menor que o tempo despendido pelo algoritmo *Força Bruta*. A Tab. 1 mostra a diferença de tempos de convergência entre os dois tipos de algoritmos implementados para diferentes números de iterações.

Tabela 1. Diferença de tempos de convergência entre o algoritmo *Força Bruta* e *Kd-Tree* para diferentes números de iterações.

Tipo de Algoritmo	Tempo de convergência (s) com 1 iteração	Tempo de convergência (s) com 10 iterações	Tempo de convergência (s) com 50 iterações	Tempo de convergência (s) com 100 iterações
ICP <i>Força Bruta</i>	3.8	21.7	216.1	470.5
ICP <i>Kd-Tree</i>	1.2	2.9	9.3	18.4

11. CONCLUSÕES

A convergência do algoritmo ICP é um parâmetro qualitativo, já que não existe um método teórico para provar sua convergência. Não obstante, a métrica utilizada neste trabalho, baseada no erro quadrático médio, forneceu um indicativo da velocidade de convergência com a qual as distâncias entre os pontos correspondentes são reduzidas entre os dois algoritmos ICP implementados, sendo evidente, ao observar os gráficos dos resultados, que as velocidades de convergência do algoritmo ICP modificado *Kd-Tree* foram maiores. O custo computacional do algoritmo ICP melhorou, utilizando o método de busca *Kd-Tree*.

O algoritmo ICP, com a modificação do algoritmo de busca *Kd-Tree*, converge mais rapidamente do que o algoritmo ICP convencional. Isso é devido à economia de tempo ao não realizar todos os cálculos para encontrar a distância mais curta entre pontos correspondentes que os feitos pelo algoritmo *Força Bruta*. A Tabela 1 mostra que o algoritmo *Kd-Tree* converge mais rapidamente que o algoritmo *Força Bruta*.

A técnica para o modelamento de objetos implementada neste artigo oferece a vantagem de reconstruir um objeto estático com poucas imagens, mas não permite realizar um modelamento de um sistema dinâmico. O objetivo do projeto foi automatizar o processo de registro e modelamento de objetos, tirando grande parte da intervenção humana ao aplicar algoritmos mais robustos.

Neste trabalho o tempo de execução não era um fator determinante, por esse motivo foi escolhido o uso do programa *Matlab* o qual tem a vantagem no manejo de matrizes na programação do algoritmo.

12. REFERENCIAS

- Akca, D, 2005. "Registration of Point Clouds Using Range And Intensity Information". Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Zurich, Switzerland, pp. 115-126.
- Arun, K., Huang, T., and Blostein, S., 1987. "Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets". Pattern Analysis And Machine Intelligence, PAMI, Vol. 9, No. 5, pp. 698-700.
- Bentley, J. L., 1980. "Multidimensional Divide and Conquer". Communications of the ACM. Vol 23, Pittsburgh Estados Unidos, pp. 214-229.
- Besl, P. J. e McKay, N. D., 1992. "A Method for Registration of 3-D Shapes". Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI. Miami, Estados Unidos, pp. 239-256.
- Chen, Y., Medioni, G., 1992. "Object modelling by registration of multiple range images". Image and Vision Computing. Sacramento, Estados Unidos, Vol. 10, No 3, pp. 145-155.
- Fuchs, H., Abram, G. D., Grant, E. D., 1983. "Near Real-Time Shaded Display of Rigid Objects". Computer Graphics. Vol. 17, pp. 65-72.
- Gu, L. F., 1997. "Visual guidance of robot motion". International Conference on Intelligent Processing Systems. Nedlands, Australia, Vol. 2, pp. 1242-1246.
- Horn, B., Hilden, H., and Negahdaripour, S., 1988. "Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices". Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, Honolulu, Hawaii, pp. 1-14.
- Hua, L., Huang, Y., Liu, Y., Ding, L., Feng, H., Gu, J., 2013. "Color Medical Image Registration Based on Quaternion". Journal of Information & Computational Science, pp. 5607-5617.
- Liu, X., Lin, L., Li, H., Jin, H., Tao, W., 2008. "Layered Shape Matching and Registration: Stochastic Sampling with Hierarchical Graph Representation". IEEE, pp. 1-4.
- Naylor B., 1993. "Constructing Good Partitioning Trees". Graphics Interface.
- Nkanza, N., 2005. Image Registration and its Application to Computer Vision: Mosaicing and Independent Motion detection, PhD, thesis University of Cape Town, South Africa.
- Pan, M., Tang, J. Yang, X., 2011. "Medical Image Registration Based on SVD and Modified PSNR". Journal of Information Science and Engineering, Vol. 27, pp. 1761-1775.
- Qu, Z., Gao, Y., Wang, P., Wang, P., Shen, Z., Chen, X., Luo, F., 2011. "Straight-Line Based Image Registration In Hough Parameter Space". International Workshop on Multiplatform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping, pp.2-7.
- Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2001. "Efficient Variants of the ICP Algorithm". Third International Conference On 3D Digital Imaging and Modeling, Stanford, Estados Unidos, pp. 145-152.
- Trucco, E. e Verri, A. (1998). Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. Prentice Hall.

13. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

IMAGE REGISTRATION OF POINT CLOUDS ACQUIRED FROM 3D SCANNERS WITH EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AN ICP ALGORITHM MODIFICATION FOR OBJECT MODELING

Jose Alejandro Bonilla Naranjo, alejandrob@unb.br
José Mauricio Santos Torres da Motta, jmmotta@unb.br

Universidade de Brasilia, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Automação e Controle (GRACO)

***Abstract.** This paper shows experimental results for the registration and alignment of range images (point clouds) using two versions of the ICP algorithm (Iterative Closest Point) to perform the object modeling. Object modeling was carried out implementing the algorithm with an ICP technique with angle variation of controlled views, to improve the result of the scanned model of a human head. The two methodologies of the ICP Algorithm have modifications during the matching step. The first version is called "brute force", which finds the corresponding points based on the shortest distance between two supposed correspondent points in a point cloud. The second version is called "kd-tree", which accelerates the search for corresponding points by storing the cloud points in a hierarchical way. Three tests were conducted to evaluate the convergence of the versions used in the ICP algorithm as a function of the number of iterations. Finally, it was shown a comparison between the convergence speeds between the two algorithms developed for the ICP algorithm.*

***Keywords:** ICP, image registration, object modeling, kd tree, brute force*