



**Instituto Politécnico**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

# Experimentos com técnicas atuais de reconstrução 3D visando a digitalização prática de esculturas suaves do Jardim do Nêgo

Pedro Felipe Pena Barata  
Orientador: Ricardo Fabbri

Instituto Politécnico do Rio De Janeiro (IPRJ)  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

27 de Novembro de 2017



- 1 Introdução
- 2 Reconstrução a laser
- 3 *Structure from Motion*
- 4 Kinect
- 5 Experimentos
- 6 Conclusão
- 7 Trabalhos futuros



## Introdução

- Reconstrução a laser
- Structure from Motion
- Kinect
- Experimentos
- Conclusão
- Trabalhos futuros

## Objetivos

### 1 Introdução

- Objetivos

### 2 Reconstrução a laser

### 3 Structure from Motion

### 4 Kinect

### 5 Experimentos

### 6 Conclusão

### 7 Trabalhos futuros



**Figura:** Algumas esculturas do Jardim do Nêgo

Perguntas a serem respondidas ao longo deste projeto:

- ① Que nível de detalhe, facilidade e precisão pode-se obter usando apenas imagens e softwares abertos?
- ② É possível utilizar scanners de baixo custo baseados em Kinect com melhorias significativas em termos de qualidade, conveniência ou tempo de processamento?
- ③ Quais são as restrições desses sistemas?



1 Introdução

2 Reconstrução a laser

- Esculturas de Michelangelo

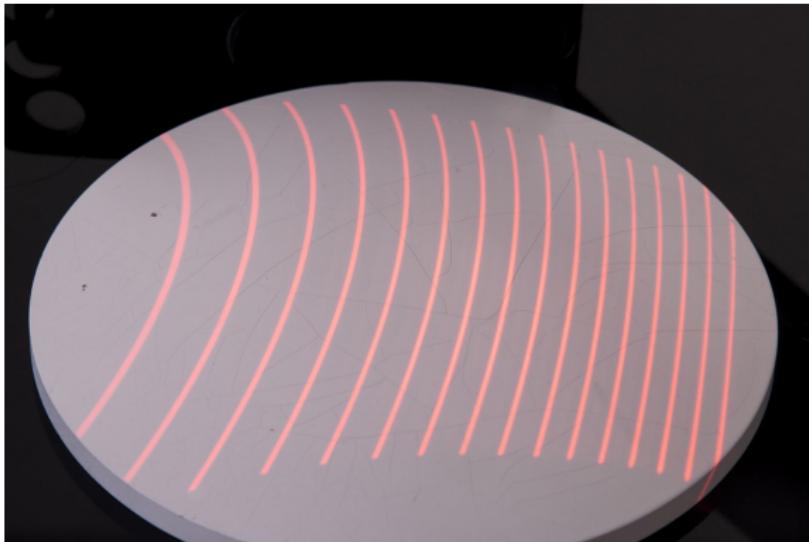
3 *Structure from Motion*

4 Kinect

5 Experimentos

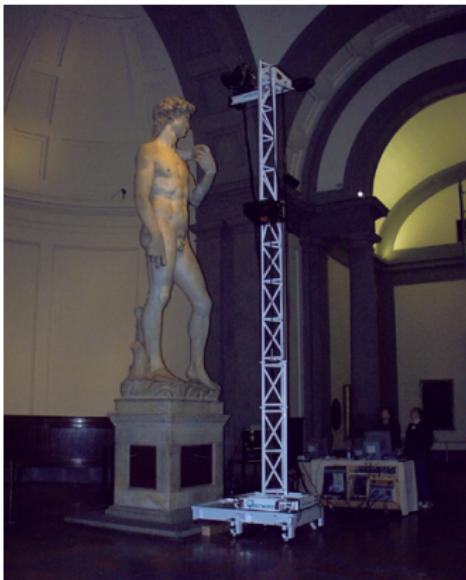
6 Conclusão

7 Trabalhos futuros

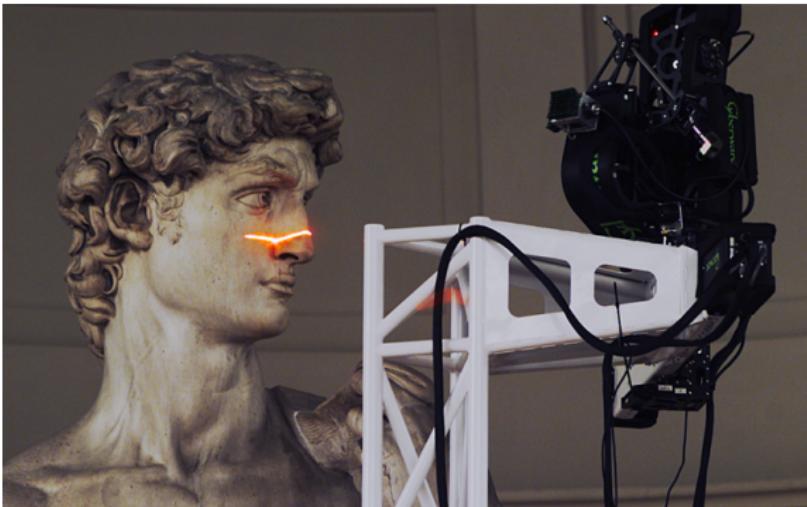


**Figura:** Exemplo de um projetor à laser.

Fonte: <http://www.opto-engineering.com/>

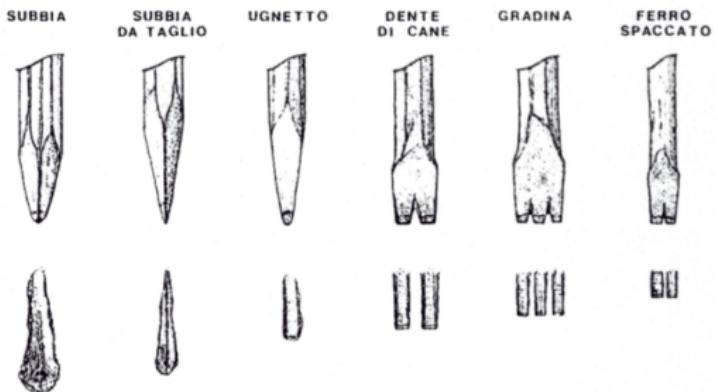


**Figura:** Scanners utilizados no projeto de reconstrução de David.  
Fonte: <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>



**Figura:** Exemplo de escaneamento da cabeça de David.

Fonte: <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>



**Figura:** Exemplos de cinzéis usados por Michelangelo

Fonte: <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>



1 Introdução

2 Reconstrução a laser

3 *Structure from Motion*

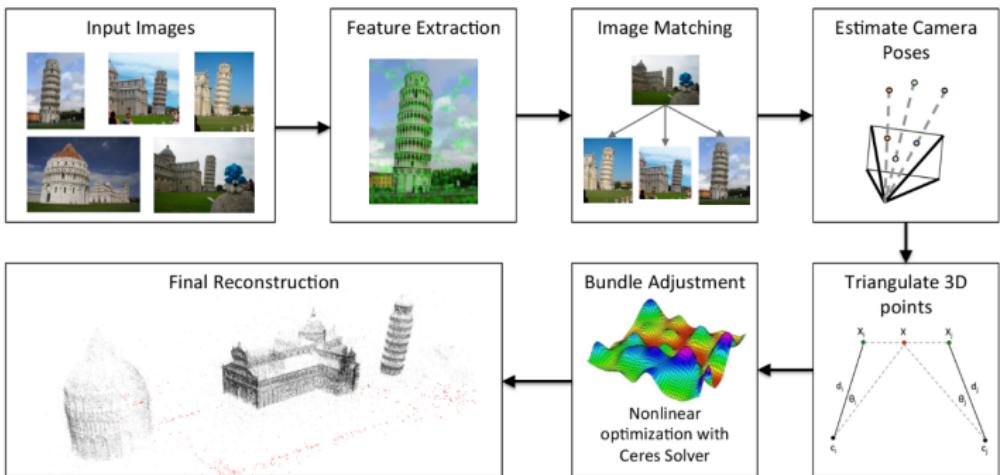
- MVE – *Multi-View Stereo Environment*
- VisualSfM

4 Kinect

5 Experimentos

6 Conclusão

7 Trabalhos futuros



**Figura:** Processo do SfM

Fonte: <http://www.theia-sfm.org/sfm.html>

## SIFT – Scale Invariant Feature Transform

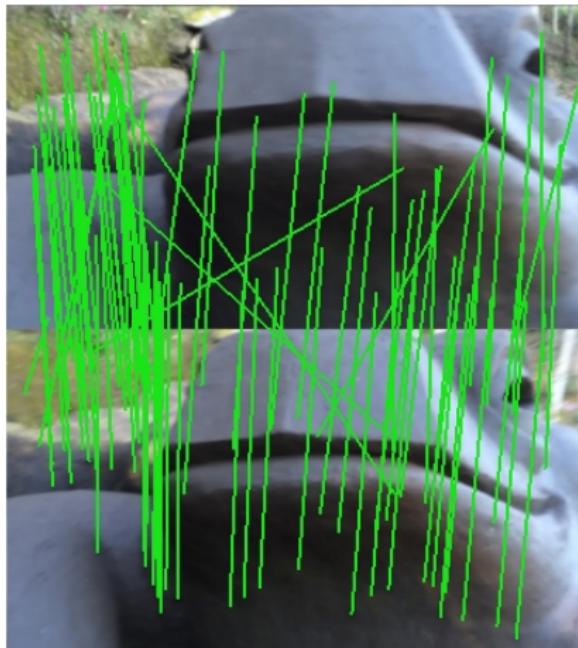


Figura: Exemplo de correspondências SIFT.



Introdução  
Reconstrução a laser  
**Structure from Motion**  
Kinect  
Experimentos  
Conclusão  
Trabalhos futuros

MVE – Multi-View Stereo Environment  
VisualSfM

## SIFT – Scale Invariant Feature Transform

COLOCAR IMAGEM DE CORRESPONDENCIAS DO INDIO

## SIFT – Scale Invariant Feature Transform

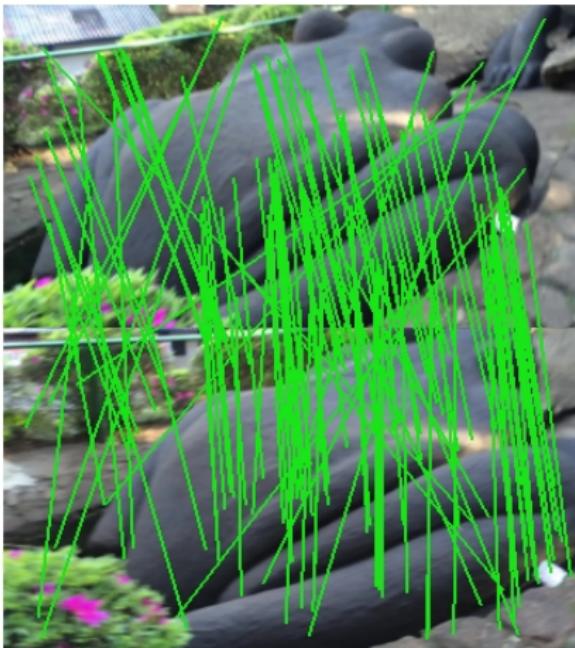
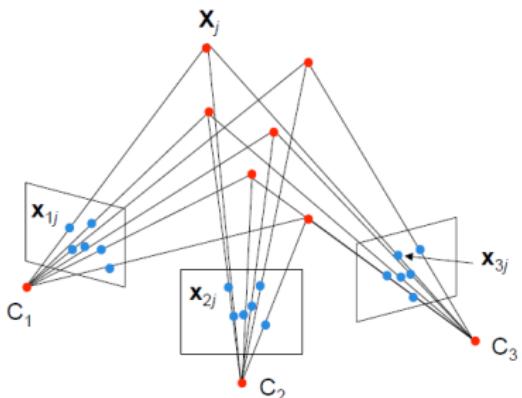


Figura: Exemplo de correspondências SIFT.

## Triangulação



**Figura:** Uma triangulação utilizando um ponto qualquer,  $X_j$ . Onde cada câmera  $C_1, C_2, C_3$  possui um *feature* correspondente a cada uma delas, respectivamente,  $X_{1j}, X_{2j}, X_{3j}$ .

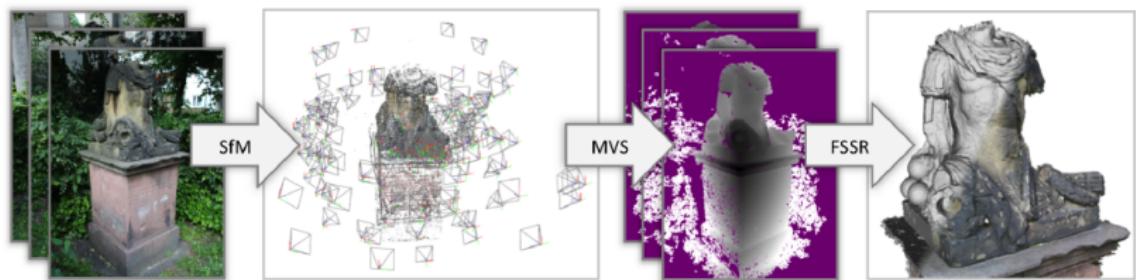
Fonte: [http://cs.nyu.edu/~fergus/teaching/vision/11\\_12\\_multiview.pdf](http://cs.nyu.edu/~fergus/teaching/vision/11_12_multiview.pdf)



## MVE – Multi-View Stereo Environment

- Reconstrução multi-escala
- Possui interface gráfica
- Baseado em mapas de profundidade
- Implementa um algoritmo de reconstrução de superfícies

## MVE – Multi-View Stereo Environment



**Figura:** Processo empregado pelo MVE.

Fonte: <https://www.gcc.tu-darmstadt.de/media/gcc/papers/Fuhrmann-2014-MVE.pdf>

## MVS



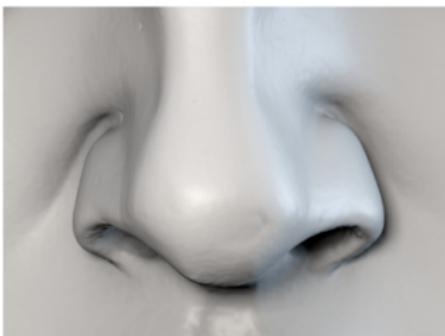
**Figura:** Mapa de profundidade de uma imagem.

Fonte: <https://www.gcc.tu-darmstadt.de/media/gcc/papers/Fuhrmann-2014-MVE.pdf>

## FSSR – Floating Scale Surface Reconstruction

Usa como entrada a união de todos os vértices dos mapas de profundidade.

A partir desses parâmetros ele calcula a representação volumétrica do passo anterior (MVS).

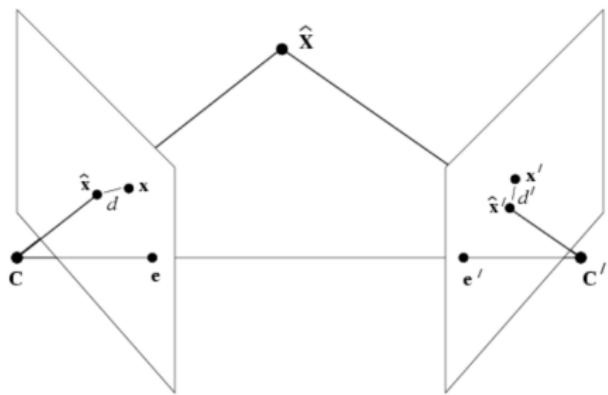




## VisualSfM

- Palavra-chave: Escalabilidade
- Possui interface gráfica
- Utiliza programação paralela em CPU e GPU
- Bom gerenciamento dos recursos computacionais

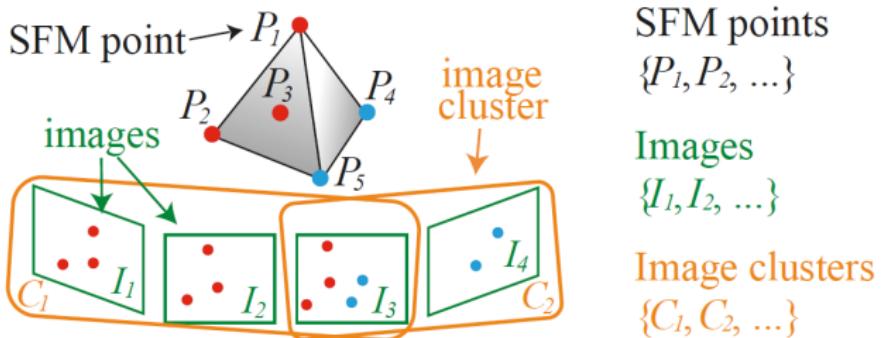
## PBA/MCBA



**Figura:** Exemplo do problema de *Bundle Adjustment*.

Fonte: <http://av.dfki.de/members/stricker/>

## CMVS/PMVS-2



**Figura:** Processo do algoritmo CMVS.  
Fonte: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5539802/>

## CMVS/PMVS-2

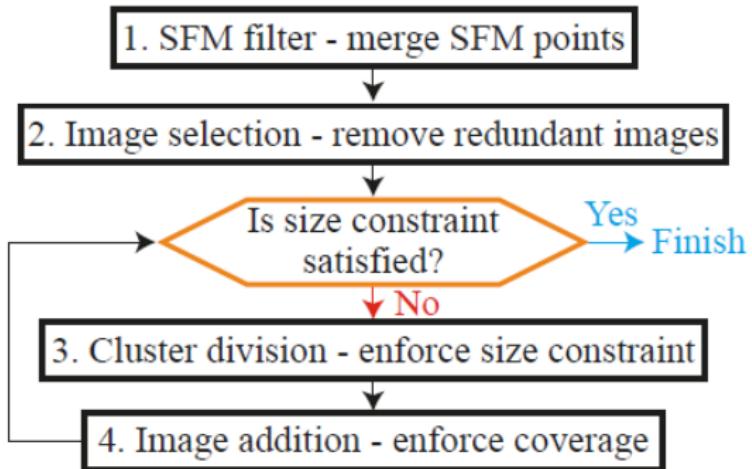


Figura: Processo do algoritmo CMVS.

Fonte: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5539802/>



- 1 Introdução
- 2 Reconstrução a laser
- 3 *Structure from Motion*
- 4 Kinect
  - Kinect com *Structure from Motion*
- 5 Experimentos
- 6 Conclusão
- 7 Trabalhos futuros



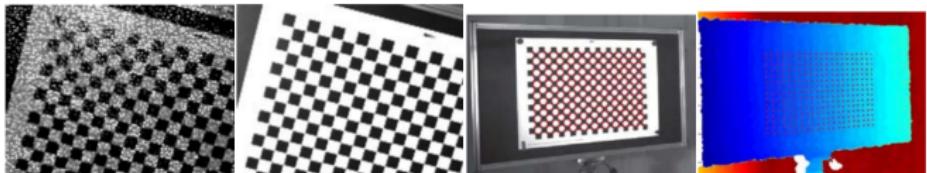
**Figura:** Kinect V1 aberto, constituído de uma câmera infra-vermelho (IR - *Infra-Red*), uma câmera RGB e um projetor IR. Fonte: <http://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/pajdla/Smisek-CDC4CV-2011.pdf>



Figura: Kinect V2.



Figura: Saída de uma imagem interpretada pelo Kinect.

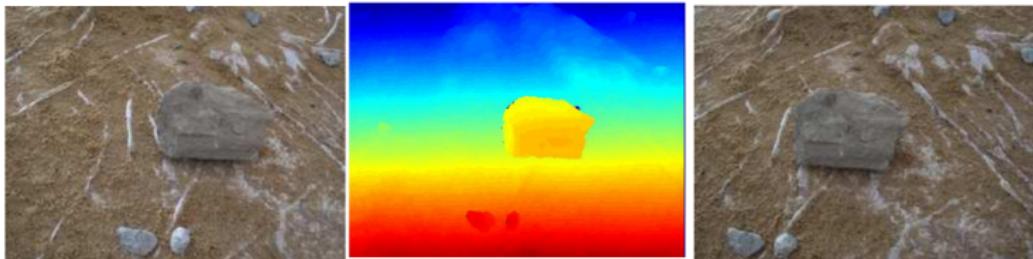


(a) Imagem IR (b) Imagem IR (c) Pontos de (d) Pontos de  
iluminada pelo com iluminação calibração calibração  
projetor de externa reproduzidos na reproduzidos na  
padrões IR imagem RGB imagem de  
profundidade

**Figura:** Método de calibração do Kinect, em imagens IR, RGB e de profundidade. Fonte: <http://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/pajdla/Smisek-CDC4CV-2011.pdf>

Tabela: Resultados dos testes executados

Método	Erro geométrico $e$ [mm]		
	$\mu(e)$	$\sigma(e)$	$\max(e)$
SLR Stereo	1,57	1,15	7,38
Kinect	2,39	1,67	8,64
SR-4000	27,62	18,20	133,85



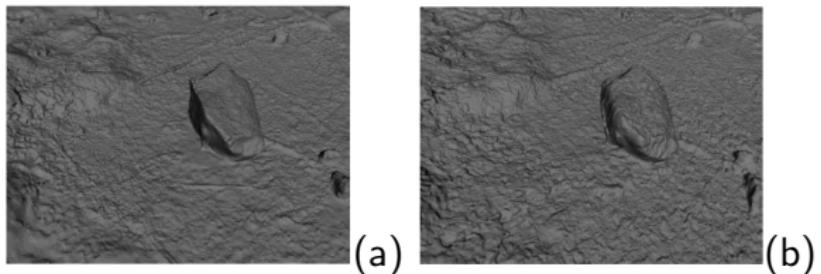
(a) Imagem do lado esquerdo da câmera SLR

(b) Imagem da profundidade do Kinect

(c) Imagem do lado direito da câmera SLR

**Figura:** Imagens iniciais para reconstrução 3D.

Fonte: <http://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/pajdla/Smisek-CDC4CV-2011.pdf>



**Figura:** Resultados da reconstrução SfM, onde (a) é a reconstrução do SLR e (b) o resultado do Kinect.

Fonte: <http://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/pajdla/Smisek-CDC4CV-2011.pdf>



1 Introdução

2 Reconstrução a laser

3 *Structure from Motion*

4 Kinect

5 Experimentos

- Objeto em ambiente fechado
- Escultura do Jardim do Nêgo

6 Conclusão

7 Trabalhos futuros

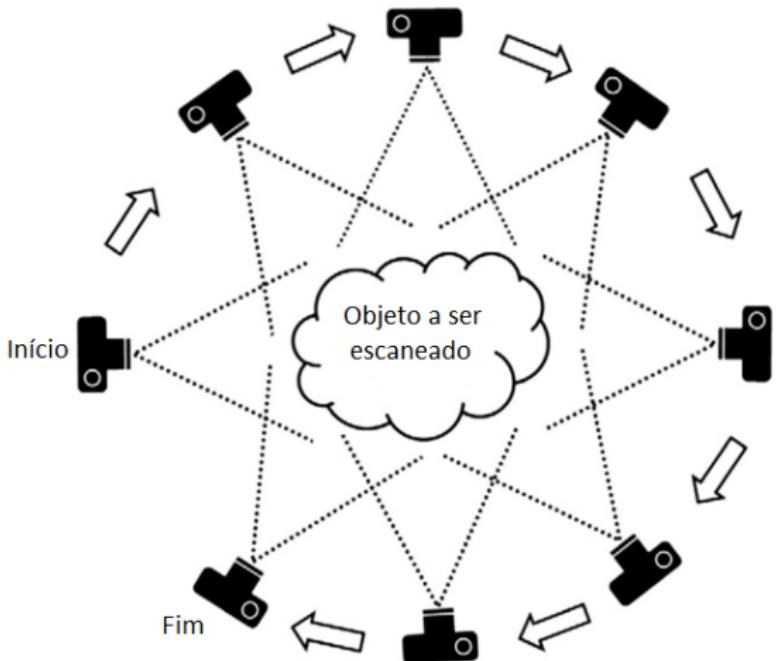


Figura: Exemplo de como foi realizada a varredura da escultura

## Conjuntos de dados:

- 2 vídeos em ambiente fechado, com um total de 224 imagens (MVE e VisualSfM);
- 2 vídeos de uma escultura (sapo), resultando em 280 imagens (MVE);
- 1 vídeo de uma escultura (índio), resultando em 197 imagens (VisualSfM).



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

**Objeto em ambiente fechado**  
Escultura do Jardim do Nêgo

Assistir o primeiro video em ambiente fechado



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

**Objeto em ambiente fechado**  
Escultura do Jardim do Nêgo

Assistir o segundo video em ambiente fechado

## VisualSfM



Figura: Botões na parte superior da interface gráfica, este seria o procedimento padrão de funcionamento do software.

Fonte: <http://ccwu.me/vsfm/>

## Objeto com 200 imagens usando o VisualSfM

Tabela: Tempos obtidos da reconstrução do objeto com 200 imagens, usando o VisualSfM

Procedimento	Tempo (aprox.)
Carregamento de imagens	50 segundos
Calcular pares correspondentes de <i>features</i>	9.540 segundos
Gerar a reconstrução esparsa do modelo	135 segundos
Gerar a reconstrução densa do modelo	1.416 segundos
Total	11.141 segundos

## Objeto com 200 imagens usando o VisualSfM

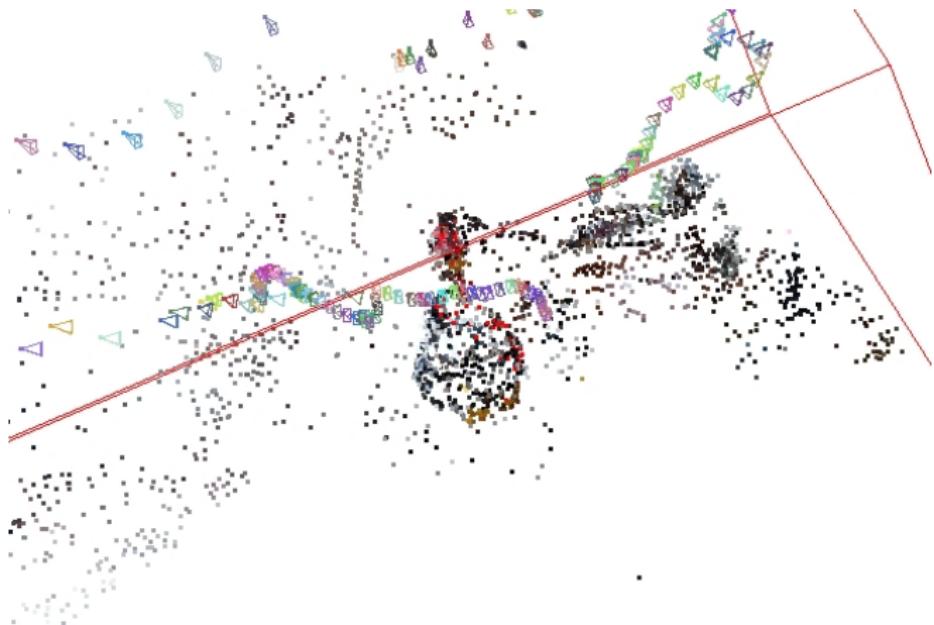


Figura: Reconstrução esparsa do objeto no VisualSfM com 200 imagens.

## Objeto com 200 imagens usando o VisualSfM



Figura: Reconstrução densa do objeto no VisualSfM com 200 imagens.



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

**Objeto em ambiente fechado**  
Escultura do Jardim do Nêgo

## Objeto com 200 imagens usando o VisualSfM

Embedded Animation

## Objeto com 224 imagens usando o VisualSfM

Tabela: Tempos obtidos da reconstrução do objeto, com 224 imagens usando o VisualSfM

Procedimento	Tempo (aprox.)
Carregamento de imagens	60 segundos
Calcular pares correspondentes de <i>features</i>	10.451 segundos
Gerar a reconstrução esparsa do modelo	162 segundos
Gerar a reconstrução densa do modelo	1920 segundos
Total	12.593 segundos

## Objeto com 224 imagens usando o VisualSfM



Figura: Reconstrução esparsa do objeto com 224 imagens no VisualSfM.

## Objeto com 224 imagens usando o VisualSfM

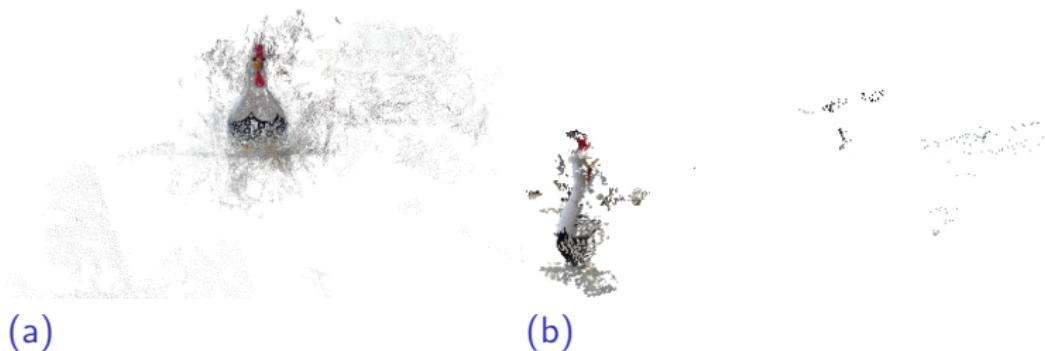


Figura: Reconstruções densas do primeiro (a) e do segundo (b) modelo do objeto no VisualSfM com 224 imagens.



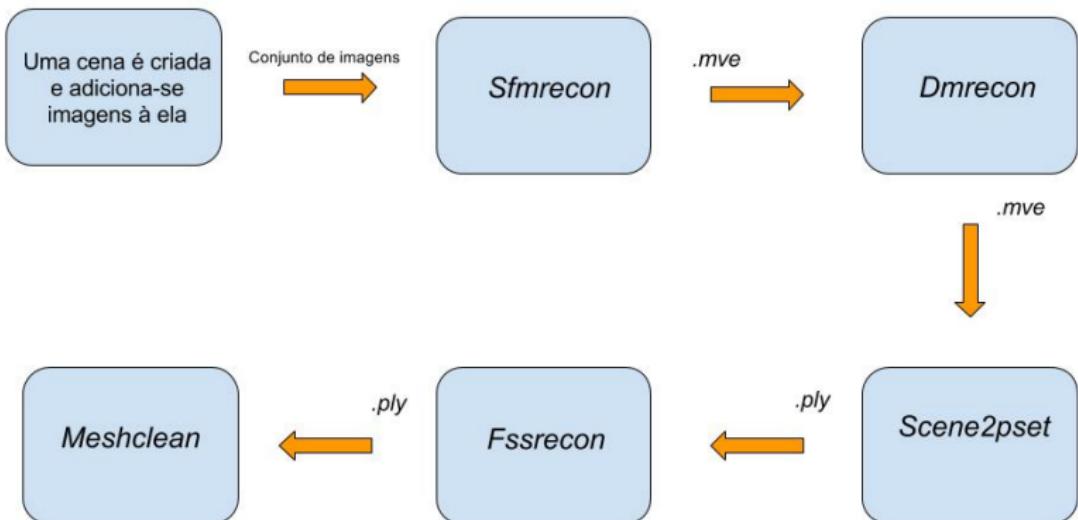
Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

**Objeto em ambiente fechado**  
Escultura do Jardim do Nêgo

## Objeto com 224 imagens usando o VisualSfM

GALINHA GIRANDO AQUI 224 IMGS!!!

# MVE



## Objeto com 200 imagens usando o MVE

Tabela: Tempos obtidos usando o MVE em um conjunto de dados em ambiente interno com 200 imagens

Comando	Tempo (aprox.)
<i>sfmrecon</i>	371 segundos
<i>dmrecon</i>	3.716 segundos
<i>scene2pset</i>	300 segundos
<i>fssrecon</i>	1.695 segundos
<i>meshclean</i>	45 segundos
Total	6.127 segundos

## Objeto com 200 imagens usando o MVE

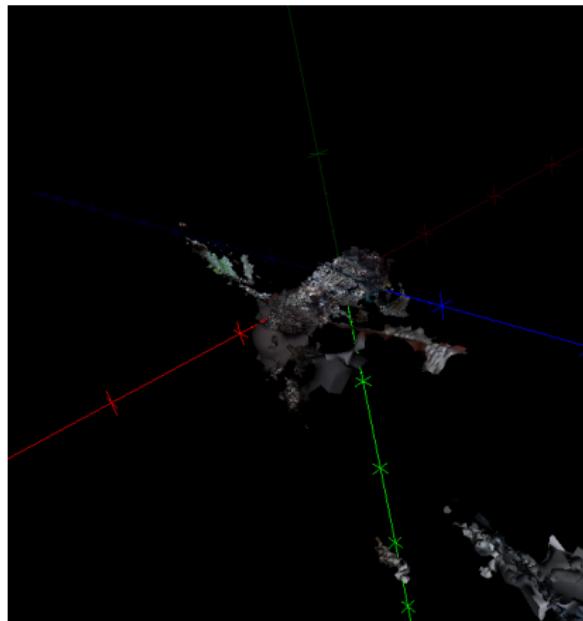


Figura: Resultado da etapa *fssrecon* do MVE

## Objeto com 200 imagens usando o MVE

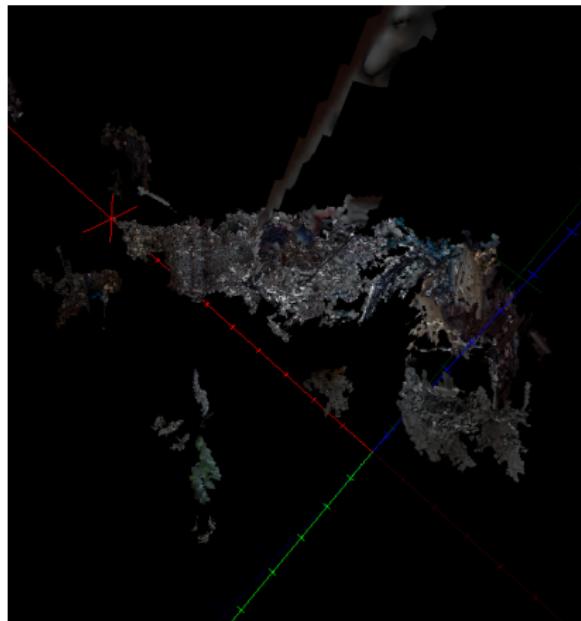


Figura: Resultado da etapa *meshclean*, da etapa anterior 29.



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

**Objeto em ambiente fechado**  
Escultura do Jardim do Nêgo

## Objeto com 200 imagens usando o MVE

GALINHA GIRANDO AQUI 200 IMGS MVE!!!

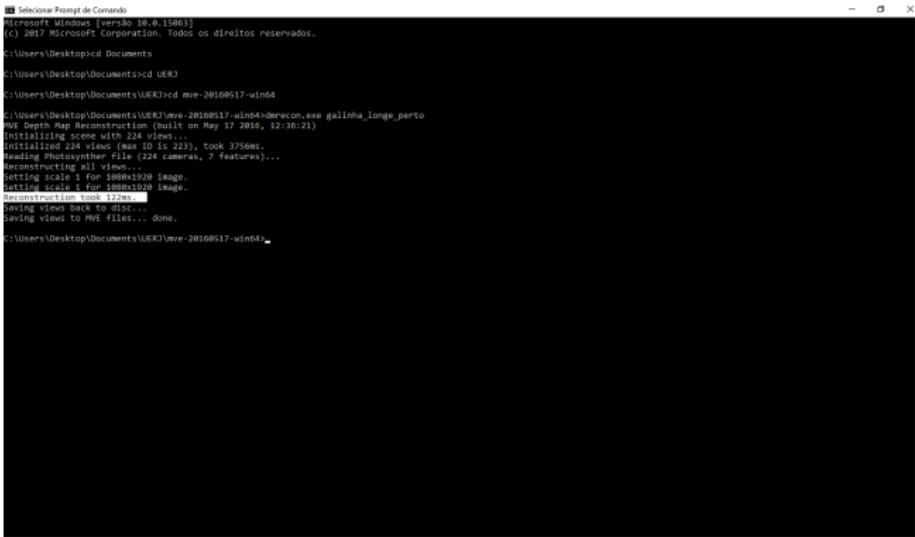


## Objeto com 224 imagens usando o MVE

```
[1] Selecionar Projeto de Concorrente
Pair 166,167: 156 matches, 160 H-inliers (84%) 
Pair 166,168: 156 matches, 160 H-inliers (84%) 
Pair 183,184: 182 matches, 131 H-inliers (66%) 
Pair 182,183: 184 matches, 134 H-inliers (72%) 
Pair 88,90: 182 matches, 135 H-inliers (74%) 
Pair 88,91: 182 matches, 135 H-inliers (74%) 
Pair 21,22: 180 matches, 134 H-inliers (63%) 
Pair 16,17: 179 matches, 154 H-inliers (88%) 
Pair 107,109: 179 matches, 134 H-inliers (74%) 
Pair 107,110: 179 matches, 134 H-inliers (74%) 
Pair 108,110: 178 matches, 128 H-inliers (71%) 
Pair 90,92: 177 matches, 161 H-inliers (90%) 
Pair 16,18: 173 matches, 132 H-inliers (76%) 
Pair 183,187: 173 matches, 132 H-inliers (76%) 
Pair 184,185: 173 matches, 123 H-inliers (71%) 
Pair 28,21: 173 matches, 121 H-inliers (69%) 
Pair 34,34: 173 matches, 120 H-inliers (75%) 
Pair 34,35: 173 matches, 120 H-inliers (75%) 
Pair 9,10: 171 matches, 144 H-inliers (84%) 
Pair 87,88: 172 matches, 151 H-inliers (88%) 
Pair 87,89: 172 matches, 130 H-inliers (75%) 
Pair 100,102: 158 matches, 137 H-inliers (70%) 
Pair 89,90: 169 matches, 162 H-inliers (95%) 
Pair 27,29: 166 matches, 124 H-inliers (74%) 
Pair 27,28: 166 matches, 124 H-inliers (74%) 
Pair 76,27: 165 matches, 134 H-inliers (69%) 
Pair 112,113: 165 matches, 140 H-inliers (89%) 
Pair 189,110: 164 matches, 135 H-inliers (70%) 
Pair 189,111: 164 matches, 135 H-inliers (70%) 
Pair 152,194: 164 matches, 130 H-inliers (67%) 
Pair 182,184: 164 matches, 161 H-inliers (61%) 
Pair 172,174: 163 matches, 67 H-inliers (41%), 28.59 pair angle
Pair 172,176: 163 matches, 67 H-inliers (41%) 
Pair 118,111: 160 matches, 145 H-inliers (98%) 
Pair 24,25: 159 matches, 104 H-inliers (68%) 
Using views 172 and 174 as initial pair.
Refining bundle adjustment...
Rejected 156 tracks with large error.
Rejected 6 tracks behind cameras.
Deleted 0 or 7 tracks (0.00%) above a threshold of 0.0156674.
PBL: MSE 3.70908e-05 -> 9.3718e-09 (M), 8 Iter., 322ms.
Camera 172, focal length: 1 -> 1.1118, distortion: -11.5434
Camera 174, focal length: 1 -> 0.898429, distortion: 5.0591
SFM reconstruction time: 24127 ms.
SFM reconstruction time: 24127 ms.
Creating bundle data structure...
Writing bundle (224 cameras)...
Writing view (224 views)...
Saving bundle C:\Users\Desktop\Documents\UFSC\mve-20160517-win64\galinha_longe_perto\synth\B.out...
Saving view C:\Users\Desktop\Documents\UFSC\mve-20160517-win64\galinha_longe_perto\views\view_0174.mve
C:\Users\Desktop\Documents\UFSC\mve-20160517-win64\
```

Figura: Resultado da etapa *sfmrecon*, com todas as imagens.

## Objeto com 224 imagens usando o MVE



```
[+] Selecionar Pastor de Comando
Microsoft Windows [versão 10.0.15063]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.
C:\Users\Deskt...p\Documents>cd UERJ
C:\Users\Deskt...p\Documents>cd UERJ
C:\Users\Deskt...p\Documents\UERJ>cd mve-20160517-win64
C:\Users\Deskt...p\Documents\UERJ\mve-20160517-win64>dmrecon.exe gallinha_longo_perto
[INFO] dmrecon 1.0.0 - build on May 17 2016, 12:36:21
[INFO] Initializing tree with 224 views.
[INFO] Reading Photosynther file (224 cameras, 7 features)...
[INFO] Recomputing 224 views.
[INFO] Recomputing 1 view for 1080x1920 image.
[INFO] Setting scale 1 for 1080x1920 image.
[INFO] Reconstruction took 127ms.
[INFO] Saving views back to disk...
[INFO] Saving view to PFM files.... done.
C:\Users\Deskt...p\Documents\UERJ\mve-20160517-win64>
```

Figura: Resultado da etapa *dmrecon*, com todas as imagens.



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

Objeto em ambiente fechado  
**Escultura do Jardim do Nêgo**

## Escultura com VisualSfM

Assistir o video do jardim do Nêgo

## Escultura com VisualSfM

Tabela: Tempos obtidos da reconstrução da escultura do Jardim do Nêgo usando o VisualSfM

Procedimento	Tempo (aprox.)
Carregamento de imagens	10 segundos
Calcular pares correspondentes de <i>features</i>	6.643 segundos
Gerar a reconstrução esparsa do modelo	220 segundos
Gerar a reconstrução densa do modelo	1.385 segundos
Total	8.258 segundos

## Escultura com VisualSfM

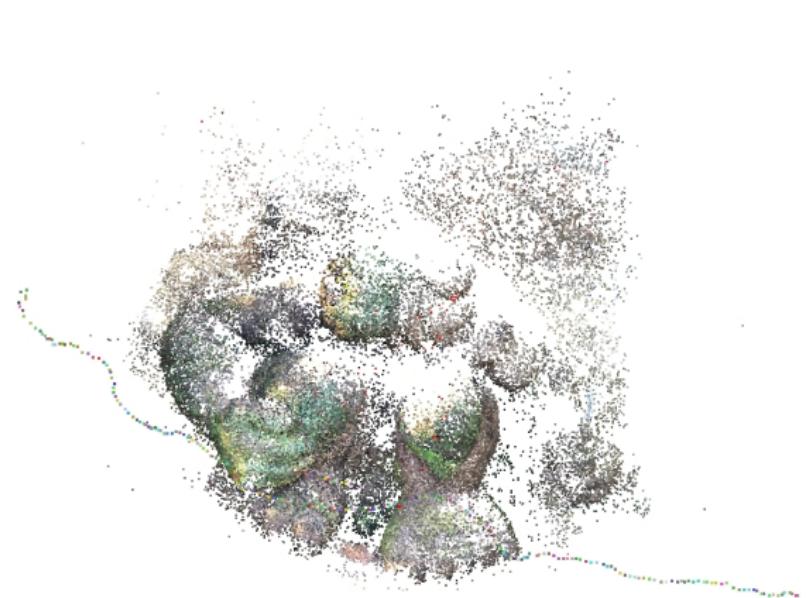


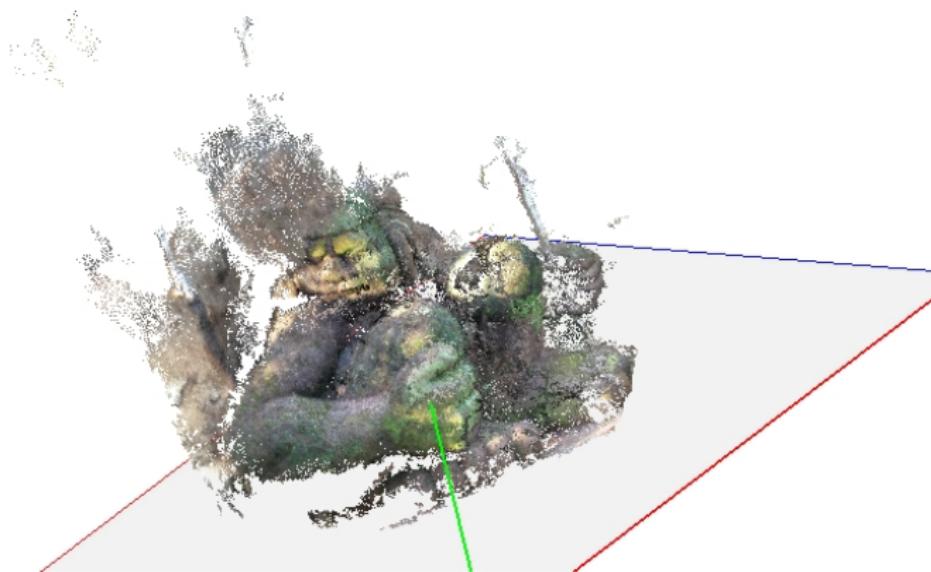
Figura: Reconstrução esparsa da escultura do Jardim do Nêgo no VisualSfM com 197 imagens.

## Escultura com VisualSfM



**Figura:** Resultados da reconstrução densa da escultura do Jardim do Nêgo usando o VisualSfM.

## Escultura com VisualSfM



**Figura:** Resultados da reconstrução densa da escultura do Jardim do Nêgo usando o VisualSfM, em outro ângulo.



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

Objeto em ambiente fechado  
**Escultura do Jardim do Nêgo**

## Escultura com VisualSfM

INDIO GIRANDO AQUI!!!



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

Objeto em ambiente fechado  
**Escultura do Jardim do Nêgo**

## Escultura com MVE

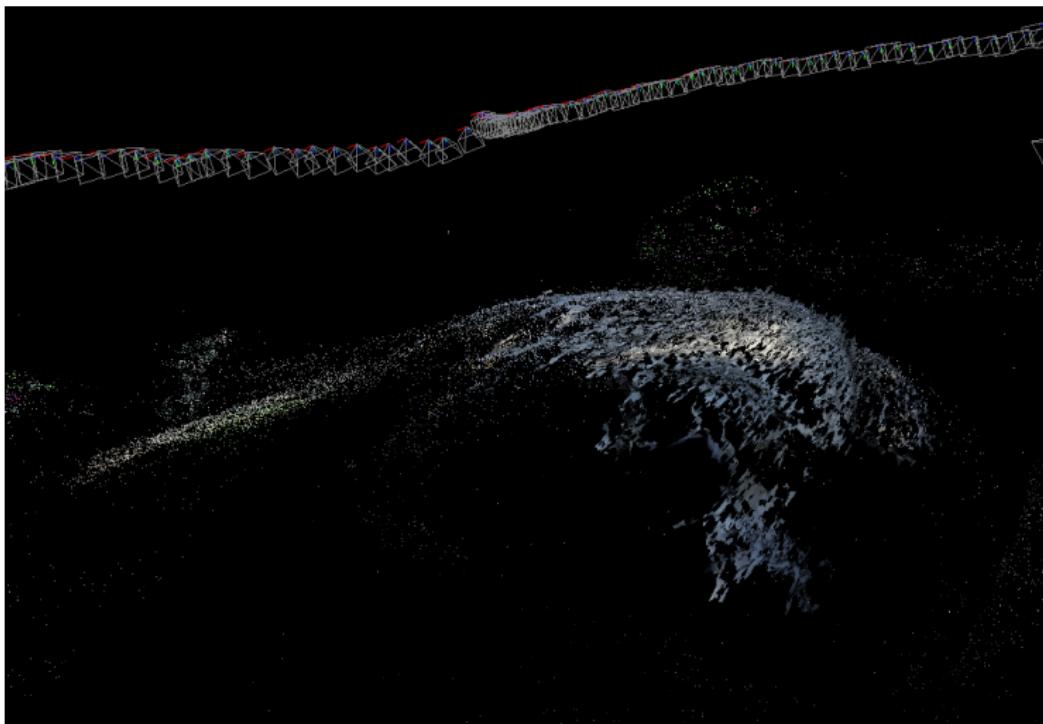
Assistir o primeiro video do jardim do Nêgo



## Escultura com MVE

Assistir o segundo video do jardim do Nêgo

## Escultura com MVE



## Escultura com MVE

Tabela: Tempos obtidos usando o MVE em um conjunto de dados do Jardim do Nêgo

Comando	Tempo (aprox.)
<i>sfmrecon</i>	78 segundos
<i>dmrecon</i>	14.503 segundos
<i>scene2pset</i>	600 segundos
<i>fssrecon</i>	25.293 segundos
<i>meshclean</i>	60 segundos
Total	40.534 segundos

## Escultura com MVE

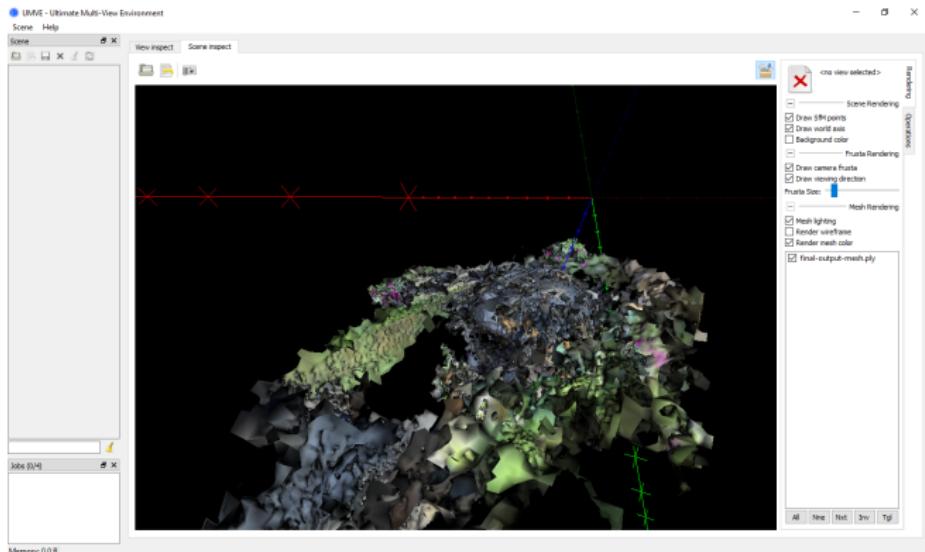


Figura: Malha com ruídos proveniente do comando *fssrecon*.

## Escultura com MVE

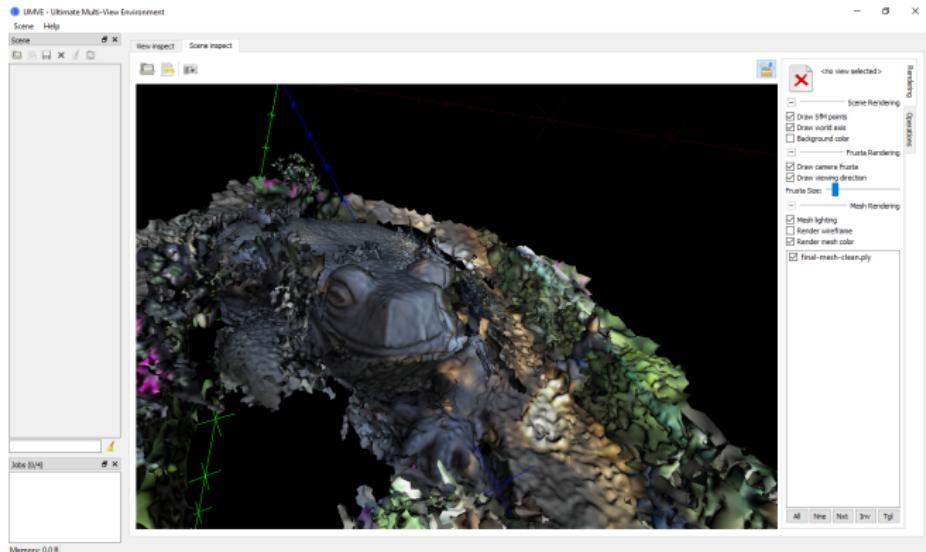


Figura: Resultado final, após a remoção dos ruídos da malha.



Introdução  
Reconstrução a laser  
Structure from Motion  
Kinect  
**Experimentos**  
Conclusão  
Trabalhos futuros

Objeto em ambiente fechado  
**Escultura do Jardim do Nêgo**

## Escultura com MVE

SAPO GIRANDO AQUI!!!



1 Introdução

2 Reconstrução a laser

3 *Structure from Motion*

4 Kinect

5 Experimentos

6 Conclusão

7 Trabalhos futuros



Apresentamos e exploramos técnicas recentes de reconstrução 3D utilizando fotogrametria, relatando problemas e dificuldades encontrados, para justificar a eventual pesquisa em novas técnicas mais avançadas.



- 1** Introdução
- 2** Reconstrução a laser
- 3** *Structure from Motion*
- 4** Kinect
- 5** Experimentos
- 6** Conclusão
- 7** Trabalhos futuros



- ① Realizar uma varredura com o Kinect.
- ② Constatar na prática, o melhor método de varredura da escultura.
- ③ Concretizar o objetivo proposto neste trabalho.



**Obrigado!  
Perguntas?**