

# Desenvolvimento de um Scanner 3D Sem Contato de Baixo Custo Usando Marcadores Artificiais

Paulo César P. Júnior<sup>1</sup>, Aldo Von Wangenheim<sup>1</sup>, Antonio C. Sobieranski<sup>1</sup>, S. L. Mantelli Neto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Informática e Estatística – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
Caixa Postal 476 – 88.040-900 – Florianópolis – SC – Brazil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Abstract.** *This work proposes a low-cost 3D scanner that uses a webcam, a laser and artificial markers. Given the high price of the most part of devices that can digitalize physical objects, it was motivated to propose low-cost versions of these tools. The concepts and the technologies used in this work are shown, and finally a prototype is presented.*

**Resumo.** *Este trabalho propõe um scanner 3D de baixo custo que utiliza uma webcam, um laser e marcadores artificiais. Dado o elevado preço da maioria dos aparelhos capazes de digitalizar objetos físicos, surgiu a motivação para propor versões de baixo custo destas ferramentas. Os conceitos e as tecnologias usadas nessa ferramenta são mostradas, e por fim um protótipo é apresentado.*

## 1. Introdução

Um scanner 3D é uma ferramenta capaz de analisar um objeto ou ambiente real e calcular uma representação digital 3D para o mesmo. Normalmente, a função do scanner é extrair uma nuvem de pontos 3D que represente a superfície do objeto alvo. Essa nuvem depois pode ser processada e transformada em um modelo 3D.

As aplicações para esse tipo de ferramenta são muitas. Designers gráficos por exemplo, não precisam mais modelar os objetos a partir do zero. Outras aplicações interessantes vêm da capacidade desta ferramenta de extrair de forma precisa as dimensões do objeto escaneado. Robôs também podem utilizar scanners para reconhecer o ambiente e então se guiar no mesmo. Na medicina scanners podem ser usados para digitalizar e visualizar partes do corpo. Áreas como identificação biométrica e a indústria de filmes também têm interesse nesse tipo de ferramenta.

Como o aumento da popularidade das impressoras 3D, viu-se uma maior procura por ferramentas capazes de digitalizar objetos físicos. Porém scanners 3D, em sua maioria, são bastante caros, fazendo assim surgir a necessidade do desenvolvimento de versões mais baratas.

O objetivo deste trabalho é propor um método barato e simples de escanear pequenos objetos utilizando um scanner 3D. O scanner proposto foi idealizado como uma solução interessante, pois utiliza poucos materiais e tem um fácil manuseio. Esses materiais são baratos e não são difíceis de conseguir, sendo eles: uma webcam, um emissor laser em forma de linha, um computador e uma mesa girante (*turn-table*) com marcadores artificiais em cima.

Na próxima seção iremos mostrar alguns dos tipos de scanners existentes, e resumidamente explicar como alguns deles funcionam. Também iremos citar em qual categoria o scanner aqui proposto se encaixa. Em seguida o modelo do scanner é proposto. Posteriormente uma fundamentação matemática sobre os conceitos utilizados nesse trabalho será apresentada, para que o leitor possa entender o funcionamento da ferramenta proposta aqui. Por último alguns resultados são exibidos.

## 2. Trabalhos Relacionados

Ao longo do tempo vários scanners foram propostos. Muitos desses usam tecnologias diferentes e se baseiam em técnicas distintas. Eles podem ser divididos em vários tipos. Na figura 1 uma hierarquia que classifica os scanners é mostrada.

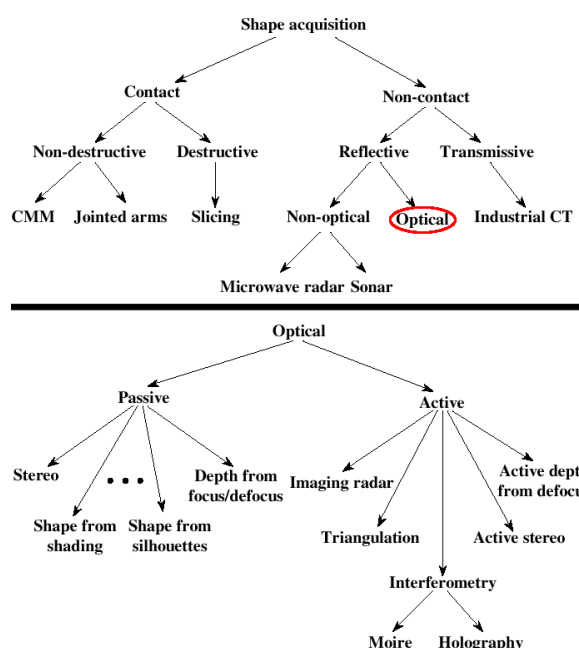


Figura 1. Hierarquia de scanners, de acordo com [Rocchini et al. 2001]

Existem dois grandes grupos de scanners, com contato (*contact*) e sem contato (*non-contact*). Dando maior foco nos sem contato, mais especificamente nos ópticos, temos os ativos (*active*) e os passivos (*passive*).

Em um scanner de contato, algum sensor do scanner toca fisicamente o objeto a ser reconstruído. Esse tipo tem normalmente um preço bem elevado, pois em geral precisa de braços robóticos complexos para movimentar os sensores. Um exemplo de um scanner com contato é o CMM (*coordinate measuring machine*, ou máquina de medição de coordenadas) [CMM - Coordinate Measuring Machine 2015].

Um scanner sem contato se limita a somente "observar" o objeto alvo, sem nenhuma forma de contato físico com o mesmo. Dentro dessa categoria temos os scanners ativos e os passivos.

Scanners ativos disparam algum tipo de sinal (luz, raio-x ou ultrassom) em direção ao ambiente ou objeto. Esses raios sofrem alterações ao colidir com o objeto e depois são capturados por outro aparelho. Baseado nessas alterações, a forma do objeto é deduzida.

Scanners passivos não disparam nada contra o objeto a ser escaneado, limitando-se a utilizar informações já disponíveis no ambiente. Scanners desse tipo normalmente são bem baratos, pois costumam usar somente câmeras digitais para filmar o objeto e utilizar as imagens para extrair a forma do objeto. Em [Narvaez and Ramirez 2012], um design de scanner passivo muito barato com duas webcams e um pequeno ambiente controlado é proposto.

## 2.1. Laser Slit Scanner

O scanner proposto neste trabalho é um *laser slit scanner*, que se encaixa nas categorias sem contato, óptico e ativo. Esse tipo de scanner é muito interessante pois pode ser construído com alguns aparelhos baratos, e ao mesmo tempo pode render resultados de qualidade.

Esse tipo de scanner, é constituído de uma ou mais câmeras digitais, porém utiliza um emissor laser em forma de linha reta. Quando a luz do laser toca a superfície do objeto, uma faixa dessa superfície fica iluminada. Com imagens do objeto sendo tocado pelo laser, pode-se reconstruir a sua superfície se baseando na deformação da linha do laser. Porém, uma pequena superfície do objeto é tocada pelo laser, fazendo assim ser necessário que o objeto ou o laser sejam deslocados durante o processo de escaneamento, para que se possa reconstruir uma maior parte de sua área.

A maior parte dos scanners desse tipo utilizam motores de precisão para fazer a movimentação. No trabalho [Acosta et al. 2006] é apresentado um scanner chamado Plus Scanner. Ele utiliza uma webcam, um emissor laser, e um sistema motorizado que rotaciona a câmera e o laser em volta do objeto. Em [Banerjee et al. 2013] a ferramenta é composta por uma câmera, um emissor laser, um motor de passo, um circuito controlador e baterias. Todo o equipamento custa menos de 1000 dólares, de acordo com o autor. Nesse sistema, a câmera fica fixa em relação ao objeto, enquanto o laser é movimentado com o motor de passo.

A vantagem em usar motores é o fato de garantir um controle preciso sobre a movimentação do sistema, e deixar a reconstrução mais automatizada, porém aumentam o custo da ferramenta.

No scanner proposto nesse trabalho nenhum motor é usado, utilizando no seu lugar marcadores artificiais que tem custo praticamente zero, fazendo com que o custo da ferramenta seja menor do que a maioria dos scanners desse tipo, já que os equipamentos utilizados são praticamente os mesmos, com exceção dos motores.

## 3. O Scanner

O scanner aqui proposto tem basicamente quatro componentes principais, sendo eles, a webcam, o emissor laser, uma mesa girante com marcadores artificiais e um computador. A imagem 2 mostra um esquemático dos componentes do scanner.

Um componente ainda não citado que aparece na imagem 2, é o tabuleiro preto e branco fixado em cima da mesa. Este é o tabuleiro de marcadores. Ele é necessário para viabilizar cálculos importantes no processo de escaneamento. Os marcadores possuem uma seção nesse documento, onde é detalhado o seu funcionamento.

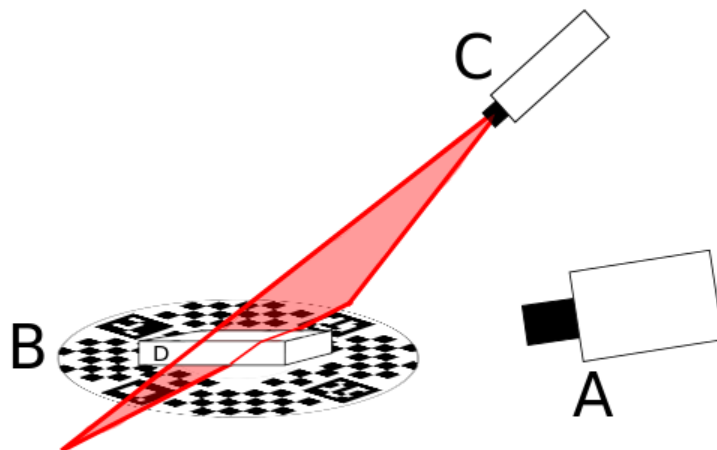


Figura 2. Esquemático do scanner proposto digitalizando uma caixa. (A) Web-Cam. (B) Mesa girante com marcadores. (C) Emissor laser. (D) Alvo do scanner.

### 3.1. Calibragem do Sistema

Para que o scanner possa funcionar, alguns passos devem ser realizados antes da sua utilização. Esses passos são:

1. **Calibrar a câmera.** O modelo de câmera utilizado é o modelo *pinhole* (também conhecido como modelo buraco de alfinete ou câmera estenopeica). Nesta etapa estamos interessados nos parâmetros internos da câmera.
2. **Calibrar o laser.** O emissor laser usado neste scanner dispara um feixe de luz na forma de uma linha reta. Dessa forma, todo o caminho percorrido pelo laser descreve geometricamente um plano no espaço. Esse plano, de agora em diante, será chamado de plano do laser. Calibrar o laser significa encontrar os parâmetros que descrevem geometricamente o laser em relação à câmera. Isso será mostrado em detalhes na seção 7.

### 3.2. Operação do Scanner

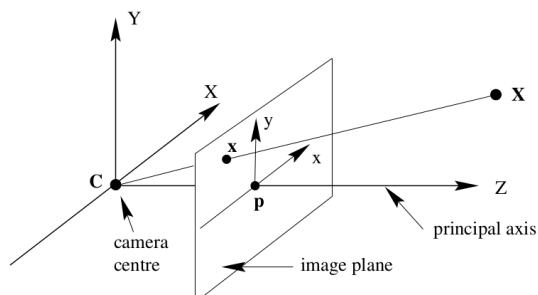
Resumidamente, o aparelho é operado da seguinte maneira. O objeto a ser escaneado é posto em cima da mesa. O laser em forma de linha é disparado em direção ao objeto. Com a câmera digital são capturadas imagens do objeto com parte da sua forma ressaltada pelo laser. Também é importante que o tabuleiro esteja bem visível nessas imagens. A mesa é rotacionada vagarosamente para que sejam pegos vários ângulos do objeto. Essas imagens são transferidas para um computador que as processará a fim de calcular a forma do objeto.

## 4. Modelo *Pinhole*

Um modelo de câmera serve para descrever a relação entre a imagem e o objeto real que está sendo visualizado na imagem. No nosso caso, o objeto sendo escaneado sobre a mesa.

Toda a notação, assim como algumas imagens, foram retiradas do livro *Multiple View Geometry* [Hartley and Zisserman 2004]. Nele, um detalhamento mais aprofundado no modelo *pinhole* pode ser encontrado.

A imagem 3 mostra o funcionamento do modelo. O que ele faz é mapear um pontos tridimensional  $X$  qualquer para o seu ponto  $x$  2D no plano da imagem.



**Figura 3. Modelo *pinhole* mapeando um ponto  $X$  em  $x$ .**

Usando coordenadas homogêneas esse cálculo pode ser feito com uma simples multiplicação de matrizes.

$$\mathbf{x} = \mathbf{KX} \quad (1)$$

onde,

$$K = \begin{bmatrix} fm_x & 0 & o_x & 0 \\ 0 & fm_y & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Essa matriz  $K$  é chamada de parâmetros internos da câmera. Todos esses parâmetros devem ser descobertos no processo de calibração da câmera. Calibrar uma câmera consiste em encontrar todos os seus parâmetros internos, ou seja, a matriz  $K$ . Para isso, em nosso trabalho foi utilizado o método de Zhang, proposto em [Zhang 2000].

## 5. Marcadores

Os marcadores usados são objetos criados artificialmente, contendo características fáceis de se distinguir em uma imagem. Eles são úteis quando há a necessidade de saber a pose da câmera em relação a uma cena, ou seja, os parâmetros externos da câmera. Para mais detalhes sobre os parâmetros externos, usar [Hartley and Zisserman 2004]

Nesse caso em específico, se deseja saber a posição da câmera em relação ao objeto sendo escaneado, pois como durante o escaneamento o objeto é rotacionado, é preciso de alguma forma acompanhar esse movimento. Como os marcadores estão dispostos em cima da mesa e se movem junto com a mesma, basta saber a pose da câmera em relação aos marcadores que também saberemos o posicionamento entre a câmera e o objeto.

Os marcadores funcionam da seguinte forma. Dado uma imagem retirada pela câmera que apareça o marcador, é possível calcular os parâmetros externos da câmera naquele dado instante. Os parâmetros externos serão denotados por uma matriz  $R$ , que nada mais é que uma matriz de rotação e translação. Ela transfere pontos do sistema de coordenadas dos marcadores para o sistema da câmera.

A ferramenta de detecção de marcadores utilizada nesse scanner foi o Aruco [Marín-Jiménez 2014], uma implementação *open-source* que utiliza a biblioteca OpenCV

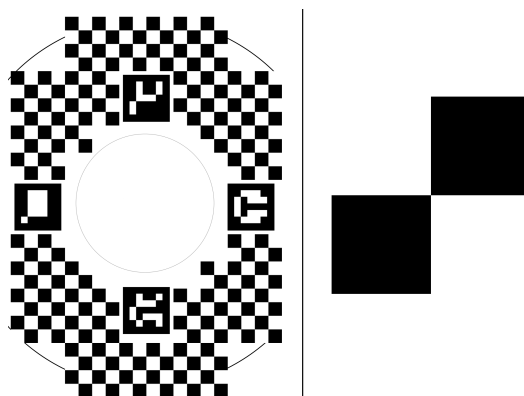
[OpenCV - Open Source Computer Vision 2015]. Esses marcadores são quadrados pretos com quadriculados brancos por dentro.

Para facilitar que pelo menos um marcador esteja sempre visível na imagem, utiliza-se um tabuleiro de marcadores. Como os marcadores aqui utilizados estão dispostos em uma mesa plana, todos eles estão situados geometricamente no mesmo plano. Esse plano é chamado de plano dos marcadores.

### 5.1. Refinadores

A precisão do cálculo da pose cresce conforme a detecção do marcador fica mais precisa, logo um erro de um pixel na detecção pode ser catastrófico no resultado final.

O que é chamado de refinador nesse documento são pequenos tabuleiros de xadrez, eles refinam a posição em pixel detectada para assim aprimorar o resultado final do cálculo da pose da câmera.



**Figura 4.** À esquerda temos um tabuleiro com 4 marcadores e muitos refinadores. À direita temos um único refinador.

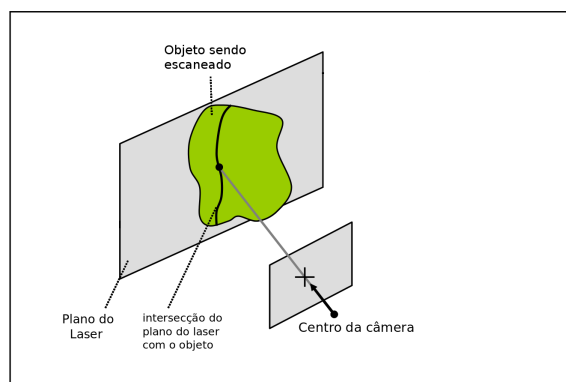
Tendo a matriz  $R$  vinda dos marcadores, e sabendo a posição dos refinadores em relação aos marcadores, é possível estimar a posição 2D dos refinadores na imagem. Tendo uma estimativa inicial, usa-se um algoritmo que utiliza o gradiente da imagem para calcular de forma mais precisa ainda a posição correta do refinador na imagem. Então, utilizando a nova posição já aprimorada dos refinadores, é calculada uma nova matriz  $R$ .

## 6. Triangulação

Um conceito importante utilizado nesse trabalho é a triangulação. Esse processo é utilizado para descobrir a posição 3D dos pontos iluminados pelo laser. Na figura 5 é possível ver a lógica utilizada.

Não é difícil notar que quando a luz do laser toca em uma superfície, a parte tocada pertence geometricamente ao plano do laser. Assumindo que um pixel em uma imagem é proveniente da projeção do laser tocando a superfície do objeto, é seguro assumir que o ponto 3D que gerou o pixel pertence tanto ao plano do laser, quanto a reta de projeção do pixel.

Sabendo disso, para calcular a posição 3D do pixel, basta calcular a intersecção do plano do laser com sua reta de projeção. Note que para fazer esse cálculo é preciso ter a câmera calibrada e conhecer a equação do plano.



**Figura 5. Princípio da triangulação. Objeto sendo cortado pelo plano do laser. Note a intersecção entre o plano e a reta de projeção. Imagem retirada de [Taubin et al. 2014]**

## 7. Calibração do Laser

Geometricamente falando, o plano:

$$\mathbf{L} = (a, b, c, d) \quad (3)$$

é definido por todos os pontos tridimensionais que satisfazem a equação 4:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

sendo  $x$ ,  $y$  e  $z$  as componentes de um ponto qualquer no espaço.

Para calibrar o laser é utilizada a ajuda do plano dos marcadores. Nesse processo é filmado um tabuleiro de marcadores, sendo cortado pelo laser em diferentes posições. Tendo a câmera calibrada, a configuração dos marcadores e esse vídeo, é possível analisar os frames do mesmo e calcular os parâmetros do laser.

Para cada frame do vídeo, detecta-se os pixels de laser e utiliza-se o cálculo de triangulação para extrair pontos 3D pertencentes ao plano do laser. Nesse caso, o plano utilizado para fazer a triangulação é o plano dos marcadores, já que este é facilmente calculado utilizando os marcadores. Depois de ter adquirido vários pontos do plano do laser, calcula-se o plano que mais se aproxima de todos os pontos.

## 8. Detecção do Laser

O processo de detecção do laser é simplesmente descobrir quais pixels representam locais iluminados pelo laser. Como o laser é colocado de forma vertical em relação a imagem, assume-se que em cada linha de pixels da imagem existe somente um pixel de laser.

Então, para cada linha da imagem é encontrado o pixel com maior intensidade vermelha (sendo que o laser tem cor vermelha). Essa intensidade é calculada de seguinte maneira:

$$intensidade = r - b - g \quad (5)$$

onde  $r$ ,  $g$  e  $b$  são os componentes vermelho, verde e azul de um pixel. Essa abordagem funciona em ambientes com iluminação controlada, em outros casos é insatisfatório.

## 9. Escaneamento

O processo de escaneamento é parecido com o processo de calibração do laser. Ambos os processos utilizam o princípio da triangulação. Conforme o objeto vai sendo filmado e rotacionado pela mesa, imagens do laser iluminando diferentes fatias são adquiridas.

Em cada imagem adquirida pela câmera é realizado o seguinte processo. Detectando o laser na imagem, utiliza-se o cálculo de triangulação para encontrar a posição 3D de cada pixel de laser. Após isso se utilizam os marcadores para calcular a matriz  $R$  (parâmetros externos). Agora é preciso colocar os pontos extraídos pela triangulação para o sistema de coordenadas dos marcadores, para isso basta multiplicar todos os pontos pela matriz inversa de  $R$ .

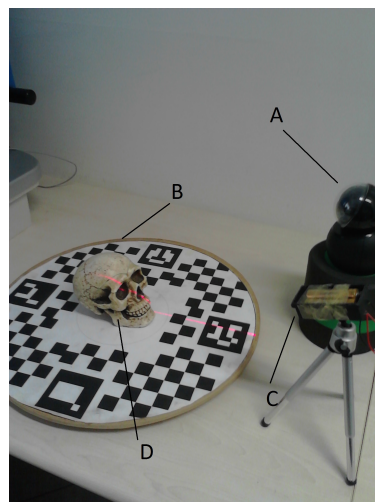
## 10. Resultados

Utilizando um protótipo já construído desse scanner, deseja-se avaliar os resultados obtidos por ele. Na figura 6 temos o protótipo em questão escaneando uma caveira de gesso.

O protótipo foi construído utilizando uma *webcam logitech* com resolução de 640x480 pixels, um laser montado em um tripé, e uma mesa girante de madeira. Alguns dos itens citados, como a mesa e o tripé, podem ser adquiridos com materiais descartáveis. Os preços estimados destes itens são:

- webcam: 50 a 150 reais.
- laser: 5 a 20 reais.
- mesa: 10 a 30 reais.
- tripe: 20 a 50 reais.

Na figura 7 temos o resultado preliminar de uma reconstrução da caveira da imagem 6. A coloração dos pontos nessa imagem é feita de forma artificial utilizando a posição dos pontos. Quanto maior a componente  $y$  do ponto, mais azul ele é.



**Figura 6. Protótipo do scanner proposto digitalizando uma caveira. (A) WebCam. (B) Mesa girante. (C) Emissor laser. (D) Alvo do scanner.**





**Figura 7. Imagens da mesma caveira em diferentes ângulos. Com fundo negro, imagens da mesma nuvem de pontos extraída da caveira.**

## **11. Trabalhos Futuros**

Como trabalho futuro para essa ferramenta, pode-se fazer uma avaliação formal de sua precisão, a fim de determinar o quão próxima é a reconstrução do objeto real. Isso pode ser feito através de reconstruções de objetos bem calibrados, com dimensões conhecidas e muito precisas.

## Referências

- Acosta, E. D., García, E. O., and Aponte, E. J. (2006). Laser triangulation for shape acquisition in a 3d scanner plus scan. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2006*, volume 2, pages 14–19. IEEE.
- Banerjee, S., Dutta, S., Biswas, P. K., and Bhowmick, P. (2013). A low-cost portable 3d laser scanning system with aptness from acquisition to visualization. In *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*, volume 1, pages 185–188. IEEE.
- CMM - Coordinate Measuring Machine (2015). [http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring\\_machine](http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine). Accessed: 2015-10-27.
- Hartley, R. and Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, second edition.
- Marín-Jiménez, S. G.-J. R. M.-S. F. M.-C. M. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6):2280 – 2292.
- Narvaez, A. and Ramirez, E. (2012). A simple 3d scanner based on passive vision for geometry reconstruction. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 10(5):2125–2131.
- OpenCV - Open Source Computer Vision (2015). <http://opencv.org>. Accessed: 2015-02-23.
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., and Scopigno, R. (2001). A low cost 3d scanner based on structured light. In *Computer Graphics Forum*, volume 20, pages 299–308. Wiley Online Library.
- Taubin, G., Moreno, D., and Lanman, D. (2014). 3d scanning for personal 3d printing: build your own desktop 3d scanner. In *ACM SIGGRAPH 2014 Studio*, page 27. ACM.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11):1330–1334.