
AUTOMATIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE CÂMERAS DE BAIXO CUSTO PARA USO EM VISÃO COMPUTACIONAL

Fábio Santos Lobão

lobao@ene.unb.br

Adolfo Bauchspiess

adolfo@ene.unb.br

ENE – FT – UNB
Caixa Postal 4386
CEP 70919-970 - Brasília DF

Resumo Neste artigo é proposta uma metodologia para calibração de câmeras de baixo custo como uma alternativa para viabilizar aplicações de visão computacional. No contexto de simplificação do processo de calibração, a automatização deste procedimento torna-se uma peça chave. Para tanto, propõe-se a calibração dos parâmetros de distorção intrínsecos às câmeras por meio de um sistema em que um processador central é responsável tanto pelas funções de processamento de imagem quanto por proceder aos ajustes necessários nos padrões de calibração. Desta forma, apresenta-se como uma alternativa eficiente, a utilização de monitores de vídeo do tipo TFT-LCD para gerar os padrões de calibração, dada a planicidade, constância luminosa, rigidez geométrica e ampla disponibilidade destes dispositivos. Os testes realizados com base neste aparato são apresentados, tomando como referência os modelos de distorção mais utilizados.

Palavras Chaves: Visão Computacional, Calibração, Câmeras CCD, Método da “Linha de Prumo”.

Abstract: This paper proposes a calibration procedure for low cost cameras as an alternative for computer vision applications. Considering ways to simplify the calibration procedures, we propose automation as a key functionality. A distortion parameter intrinsic calibration procedure was conceived to be carried out by a prototype system with a central controller that can carry out the image processing tasks and adjust properly the calibration parameters. It is an efficient alternative to use TFT-LCD video monitors as calibration standards, because their flatness, homogeneous illumination, geometric stiffness and availability. The experimental results obtained with the proposed setup are based on the usual camera distortion models.

Keywords: Computer Vision, Calibration, CCD Camera, “Line of Plumb” Method.

1 INTRODUÇÃO

Uma das questões primordiais na área de visão computacional reside justamente no processo de aquisição das imagens. Este problema foi extensivamente tratado em inúmeros trabalhos, a começar pela área de fotogrametria, ainda no século 19, conforme Whitmore (1952), em estudos que estabeleceram bases para os modelos de câmeras e distorções em imagens neste tipo de dispositivo.

O advento de sistemas digitais e posterior avanço da visão computacional como uma área de pesquisa independente, se por um lado fundamentou-se nos alicerces da fotogrametria, trouxe também novos desafios para a utilização de câmeras como dispositivos de medição.

Verifica-se que as câmeras utilizadas em visão computacional, quando comparadas aos dispositivos utilizados em fotogrametria, são tipicamente de baixa resolução (normalmente inferior a 600x400 pixels), montadas com significativa falta de alinhamento e utilizando lentes de baixa qualidade (forte distorção).

Vários dos problemas de distorção encontrados foram estudados e equacionados ainda na área de fotogrametria (Ask, 1952), provendo soluções e fundamentação física para grande parte destas dificuldades. Na área de visão várias soluções adicionais foram ainda elaboradas, dentre os quais cabe citar o trabalho homônimo de Tsai (1987).

Conforme discussão sintetizada por Tu e Dubuisson (1992), vários fatores além dos normalmente observados em câmeras fotogramétricas, afetam a qualidade das imagens obtidas com as câmeras CCD analógicas normalmente utilizadas em aplicações de visão, destacando-se neste caso as distorções devidas a diferenças entre a resolução física do dispositivo CCD e o número de linhas codificadas em modo analógico (NTSC, PAL, etc), erros de quantização e problemas na captura de objetos em movimento devido a relativamente baixa taxa de varredura.

De forma geral, pode-se verificar na literatura que este campo foi extensivamente explorado nas últimas décadas, consolidando vários algoritmos e metodologias para caracterização de sistemas de visão.

Considerando as diversas metodologias apresentadas na literatura e tomando como inspiração os princípios de testes automatizados para determinação de funções de transferência de sistemas mais simples (áudio por exemplo), buscou-se neste trabalho uma alternativa para a caracterização de sistemas de visão, substituindo desta forma o conceito de padrões e painéis rígidos, que demandam forte interação do experimentador e propiciam reduzido número de pontos de teste, por uma tela de

matriz ativa, onde os padrões de teste podem ser projetados sequencialmente, flexibilizando o processo de calibração

Nas próximas seções, faremos considerações sobre algumas das metodologias disponíveis para calibração de sistemas de visão utilizando padrões de referências co-planares, condição esta semelhante ao ora proposto. Em seguida avaliaremos as características físicas de monitores e sua adequação para execução dos ensaios propostos. Ao fim apresentaremos os resultados experimentais obtidos e algumas considerações práticas para a realização do experimento proposto e suas futuras aplicações.

2 MODELOS MATEMÁTICOS E TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO

O processo de calibração para sistemas de visão é definido essencialmente por metodologias que visam o estabelecimento dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, permitindo a associação das dimensões de componentes da imagem, medidas em pixels, com dimensões físicas no espaço.

Conforme definição sucinta de Batista *et alii* (1999), os parâmetros extrínsecos definem as operações de rotação e translação que relacionam o sistema de coordenadas da câmera com o sistema de coordenadas do “mundo”. Os parâmetros intrínsecos por sua vez determinam o mapeamento de cada pixel como uma projeção dos raios de luz no sistema de coordenadas da câmera.

2.1 Modelo “Pin-Hole”

Matematicamente podemos representar os parâmetros extrínsecos pela seguinte expressão:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

Onde: \mathbf{R} representa uma matriz 3x3 que determina a orientação da câmera no espaço tridimensional; \mathbf{T} representa uma matriz de translação que define a posição da câmera com relação ao sistema de coordenadas globais; (x_c, y_c, z_c) são as coordenadas da projeção de um ponto qualquer (x, y, z) em um sistema centrado na câmera.

Os parâmetros intrínsecos, para o modelo mais simples de câmera, são a distância focal (f), a posição em pixels do centro da imagem (r_0, c_0) e os fatores de escala (s_u, s_v) , relacionados conforme as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} u &= f \frac{x_c}{z_c} \\ v &= f \frac{y_c}{z_c} \\ r &= s_u u + r_0 \\ c &= s_v v + c_0 \end{aligned} \quad (2)$$

As técnicas para determinação destes parâmetros são diversas, conforme revisão apresentada por Weng *et alii* (1992), estas podem ser classificadas dentre as seguintes: minimização não linear direta, tradicionalmente usadas na área de fotogrametria; Solução fechada; ou a solução em dois passos, conforme, por exemplo, a clássica alternativa proposta por Tsai (1987).

Todos os métodos acima se baseiam essencialmente na utilização de padrões de calibração que, fornecendo um número suficiente de referências precisamente determinadas no espaço de coordenadas (x, y, z) e que possam ser claramente associadas a pontos nas imagens com coordenadas (r, c) , permitem a determinação dos parâmetros das câmeras acima descritos por meio de algoritmos matemáticos e computacionais.

De forma geral, conforme Batista *et alii* (1999), a determinação global de todos os parâmetros de uma ou várias câmeras demanda a utilização de pontos de calibração não co-planares, apesar de muitas técnicas utilizarem variações para calibração com padrões definidos em um único plano, para tal se valendo de movimento de câmeras ou de conhecimentos prévios de alguns dos parâmetros das câmeras investigadas.

É relevante mencionar ainda alternativas aos métodos baseados em padrões de calibração. Normalmente tais metodologias são enquadradas no conceito de auto-calibração, como por exemplo as utilizadas por Azarbajani e Pentland (1995). Tais procedimentos permitem a determinação de alguns dos parâmetros das câmeras, todavia normalmente possuem restrições quanto à exatidão dos resultados obtidos.

O modelo apresentado nas equações (1) e (2), apesar de numericamente bem determinado por quaisquer das metodologias disponíveis, apresenta sérias restrições por não considerar as distorções provenientes de não linearidades da lente ou na montagem da câmera.

As principais fontes de erro e incerteza para câmeras do tipo CCD, normalmente amplamente disponíveis, foram amplamente estudados por vários pesquisadores na área de visão, sendo discutidos a seguir.

2.2 Fontes de Distorção da Imagem

Conforme revisão apresentada por Weng *et alii* (1992) e Tu e Dubuisson (1992), as principais fontes de distorção encontradas resultam essencialmente em distorções de composição radial e tangencial com relação ao centro óptico da lente.

Distorções radiais são principalmente ocasionadas pelas características físicas da lente utilizada, sendo tanto mais forte quanto menor for a distância focal da lente utilizada. Tal característica é portanto especialmente crítica para as aplicações em ambientes confinados e/ou de monitoração.

Distorções tangenciais estão principalmente associadas à falta de alinhamento entre a superfície de captação do CCD e o eixo óptico da lente ou a falhas construtivas da lente.

As distorções radiais e tangenciais são normalmente combinadas devido à natureza física dos fenômenos que as produzem, não podendo ser, normalmente, dissociadas. Do ponto de vista matemático, seguiremos com a notação de Weng *et alii* (1992), que definem a distorção total como sendo:

$$\begin{aligned} \delta_u(u, v) &= (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + k_1u(u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + k_1v(u^2 + v^2) \end{aligned} \quad (3)$$

A distorção radial nas direções vertical e horizontal é explicitada na equação acima pelos seguintes componentes, que serão objeto de atenção neste trabalho:

$$\begin{aligned}\delta_u(u, v) &= k_1 u (u^2 + v^2) \\ \delta_v(u, v) &= k_1 v (u^2 + v^2)\end{aligned}\quad (4)$$

É importante mencionar o fato de que as expressões acima se encontram em forma simplificada. Conforme afirmado por Weng *et alii* (1992) as distorções radiais apresentam componentes de ordem superior que foram desconsiderados para simplificação do modelo em questão. Tal simplificação, comumente encontrada na literatura, justifica-se devido a magnitude das componentes aqui desprezadas, que segundo verificado por Valkenburg e Evans (2002), é cerca de 1 milhão de vezes menor.

O cálculo das constantes tangenciais (g_1 , g_2 , g_3 e g_4) e da componente radial k_1 pode ser realizado por diversos algoritmos. Normalmente são utilizados procedimentos de minimização associados ao processo de determinação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera.

Conforme Heikkilä e Silvén (1996), outros fatores como quantização e iluminação também devem ser observados quando planejando o uso de câmeras de baixo custo. A correção por tais fatores deve ser todavia realizada por meio de otimização dos algoritmos utilizados e eventualmente pela aplicação de técnicas de restauração e realce de imagem.

2.3 Calibração pelo Método da “Linha de Prumo”

Entre as várias alternativas para calibração de câmeras, destacamos aqui o método da “linha de prumo” (*plumb line*). Este método, conforme apresentado por Valkenburg e Evans (2002), e similarmente por Stein (1997) permite a caracterização das distorções introduzidas pelas lentes, sem a necessidade de determinação dos parâmetros extrínsecos.

Considerando os modelos matemáticos anteriormente apresentados, esta técnica de calibração baseia-se essencialmente na identificação de linhas de referência na imagem e no conceito de que linhas retas no objeto filmado devem permanecer retas na imagem produzida.

3 MONITORES LCD COMO GERADORES DE PADRÕES DE CALIBRAÇÃO

Na literatura podemos encontrar uma ampla variedade de estruturas utilizadas como referência para realização do processo de calibração. Na área de visão, os processos ativos, isto é, onde o computador que processa a calibração possui controle direto das condições físicas do experimento, normalmente restringem-se ao controle mecânico da posição do alvo, como por exemplo em Tsatsakis *et alii* (1995) e Shen e Menq (2001), ou da câmera.

Em nossa proposta, entendemos ser viável a utilização de monitores do tipo TFT-LCD (Thin Film Transistor – Liquid Crystal Display) para geração de padrões co-planares de calibração devido às seguintes características observáveis neste tipo de dispositivo

Monitores do tipo TFT-LCD, conforme informações providas pelos fabricantes (LG.Philips LCD©), são dispositivos construídos sobre duas placas de vidro, uma inferior onde é formada a matriz de transistores e uma superior onde é formada a camada de filtros que permite a realização das cores. Entre as duas placas, é injetado o cristal líquido.

Esquemáticamente esta construção pode ser representada pelo diagrama apresentado na Figura 1.

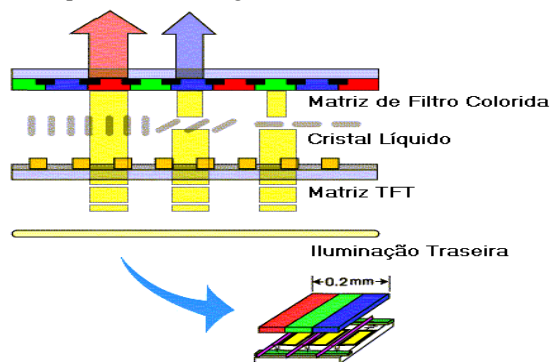


Figura 1 – Estrutura de um monitor TFT-LCD

Funcionalmente, a matriz TFT transmite e controla os sinais elétricos que determinam o campo elétrico aplicado ao cristal líquido. O cristal por sua vez, de maneira proporcional a este campo elétrico, se orienta polarizando a luz e controlando a permeabilidade luminosa em cada uma das células de cor que determinam um pixel.

O processo de manufatura, por meio de deposição de materiais, litografia e gravações, é bastante semelhante ao utilizado na indústria de componentes eletrônicos, a principal diferença encontra-se no substrato, que no caso dos monitores TFT-LCD é sobre uma placa de vidro.

De forma geral, verifica-se portanto que em monitores convencionais TFT-LCD, com resolução SVGA (800x600) ou XGA (1024x768) é possível traçar formas geométricas planas de qualquer natureza com uma exatidão que varia entre 0,3 e 0,2 mm, respectivamente.

Do ponto de vista geométrico, devido à natureza do processo litográfico, não é incomum encontrarmos monitores cujas dimensões dos pixels sejam determinadas com exatidão maior que $10\mu\text{m}$. A planicidade do monitor é também assegurada como uma contingência do próprio processo de fabricação dos monitores, sendo os desvios normalmente desprezíveis para as aplicações de visão pretendidas.

Desta forma, pode-se montar um plano de testes semelhante ao utilizado por Lenz e Tsai (1988) sem a necessidade de realização de processos fotográficos complexos e com a dinamicidade de um monitor.

Duas observações importantes devem ser ressaltadas.

- i. Devido à natureza do processo de funcionamento dos monitores TFT-LCD, torna-se inviável a utilização de filtros polarizadores como recurso para redução de reflexos sobre a superfície de vidro. Tal recurso poderia ser utilizado em outras situações para aprimorar a qualidade das imagens coletadas.
- ii. A grande maioria dos monitores disponíveis, assim como indicado no diagrama da Figura 1, utilizam a técnica de iluminação traseira (*backlight*) para prover uma melhor visualização para os usuários em ambientes pouco iluminados. Tal característica normalmente introduz uma característica de iluminação não homogênea na tela, o que representa dificuldades adicionais para o processamento da imagem.

4 APARATO EXPERIMENTAL

Para realização do experimento proposto, foi utilizado o seguinte aparato: Uma câmera CCD 1/3" (6,3×5,4mm) preto e branco, resolução de 510×492 pixels e sensibilidade de 0,05lux (F=1.2); Lente de 4mm. A saída analógica desta câmera, em padrão NTSC-M com 460 linhas de TV foi digitalizada por uma placa de aquisição de vídeo PCI a 30 quadros por segundo, operando com resolução de 320×240 pixels. Para geração das imagens foi utilizado o monitor TFT-LCD de 12,1 polegadas com resolução de 800×600, integrante de um computador portátil Toshiba 2180CDT.

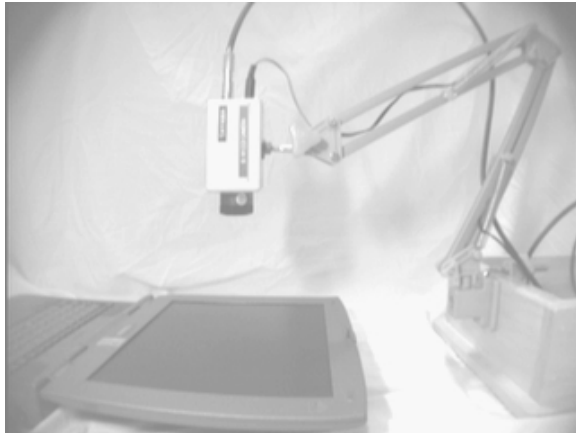


Figura 2 – Montagem de testes utilizada

Considerando o objetivo traçado para este experimento, que se resume à caracterização de alguns dos parâmetros intrínsecos da câmera testada, a definição geométrica com exatidão dimensional conhecida da posição, a direção e o sentido da câmera e dos objetos filmados podem ser desconsiderados.

Desta forma, buscando-se posicionar a câmera de modo a que, aproximadamente, o eixo focal perpendicular ao plano estabelecido pelo monitor TFT, foram testados dois padrões de teste, descritos conforme a seguir:

1. Conjunto de linhas horizontais formando uma grade uniforme com 6,00mm de espaçamento (Figura 3);
2. Conjunto de linhas verticais formando uma grade uniforme com 6,16mm de espaçamento (Figura 4);

Nestas figuras podemos verificar algumas características críticas para o experimento realizado:

- i. Face à proximidade requerida para que a tela pudesse ser devidamente enquadrada (aproximadamente 20cm) e o modelo de câmera utilizado, que não permite ajuste de diafragma, torna-se impossível obter um ajuste de foco que seja capaz de prover uma qualidade de imagem ideal em todos os seus pontos.
- ii. Conforme previsto, a iluminação de fundo não apresenta uma distribuição homogênea na tela, gerando distorções de iluminação que não podem ser facilmente corrigidas.
- iii. Face às diferenças de resolução entre o sensor CCD, ao padrão de vídeo analógico e à resolução de operação da placa de captura, verifica-se forte atenuação nas altas frequências da imagem, identificável por suavização das transições e não justificável pelas diferenças no ajuste de foco.

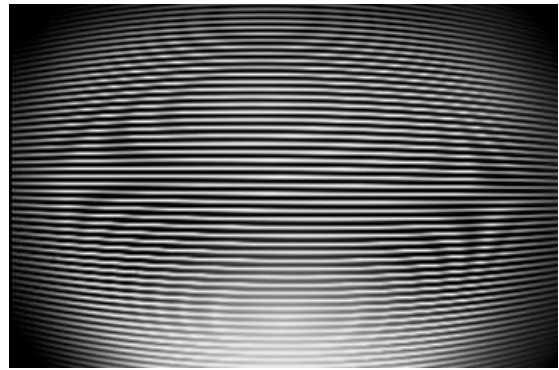


Figura 3 – Padrão de testes horizontal

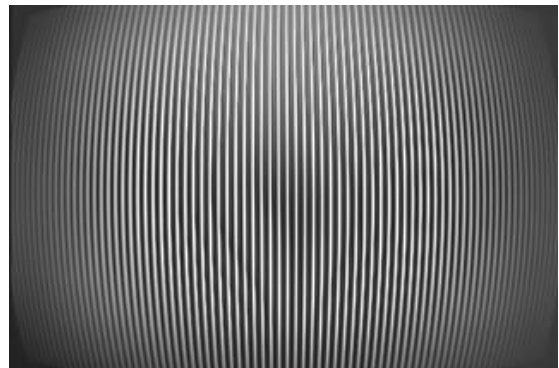


Figura 4 – Padrão de testes vertical

As dificuldades acima descritas podem ser parcialmente solucionadas, ou ter seus efeitos minimizados, pela adequada aplicação de técnicas de processamento de imagem. O uso de lentes com maior distância focal, melhor controle do obturador, assim como telas com maiores dimensões representam outros recursos que podem minimizar os efeitos mencionados.

Outra preocupação que deve ser tomada diz respeito à iluminação ambiente. Esta deve ser mantida em um mínimo para evitar reflexos sobre a tela, o que potencialmente prejudicariam ainda mais as análises posteriores. De forma geral, a iluminação provida pelo próprio monitor LCD é suficiente para a realização dos experimentos, especialmente se utilizadas câmeras com boa sensibilidade.

Com o intuito de ampliar a exatidão das medidas no padrão de calibração TFT-LCD, deve-se ainda evitar a utilização de cores. Dada a composição RGB de cada pixel, verifica-se que o uso de cores pode ampliar a incerteza nas dimensões dos objetos traçados mais de 10 vezes, dos aproximadamente 10µm informados pelos fabricantes para até 2/3 de um pixel, ou seja, 200µm.

5 ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO

Seguindo metodologia semelhante à proposta por Valkenburg e Evans (2002), buscou-se através das informações contidas nas imagens apresentadas na Figura 4, determinar alguns dos parâmetros essenciais que caracterizam a distorção na imagem, conforme descrito no item 2.2 deste artigo.

As seguintes etapas experimentais foram adotadas:

- i. Ajustado o aparato experimental conforme discutido, foram capturadas 30 imagens ao longo de 1 minuto de cada um dos padrões. Ao todo foram utilizados 10 padrões semelhantes aos apresentados na Figura 4, sendo 5 destes de linhas horizontais e 5 verticais, cada um

variando entre si por um deslocamento de aproximadamente 1,2mm em direção perpendicular à grade.

- ii. Cada imagem foi submetida a um processo de realce e restauração. Inicialmente computou-se a média de imagens “idênticas”, buscando a redução do ruído inerente ao processo de captura analógica. Pela aplicação de algoritmos para detecção de bordas, filtragem e equalização por região, buscou-se minimizar os efeitos decorrentes das deficiências de iluminação e foco já apontadas. Ao final, foi realizado um processo de limiarização com o objetivo de binarizar a imagem, e simplificar as etapas de processamento consecutivas.
- iii. Utilizando um algoritmo de detecção de linhas horizontais e verticais, baseado em crescimento de regiões, todavia modificado especificamente para resolver de maneira otimizada o problema em questão, obtiveram-se resultados similares aos apresentados na Figura 5. Nesta, os pixels identificados foram assinalados com cores alternadas de acordo com a linha a que pertencem.
- iv. Considerando que o modelo de distorção utilizando é quadrático, realizou-se a aproximação dos pontos identificados por polinômios de 2ª ordem. As funções identificadas e seus pontos de inflexão são apresentados ainda na Figura 5, em cores azul e por círculos vermelhos, respectivamente.

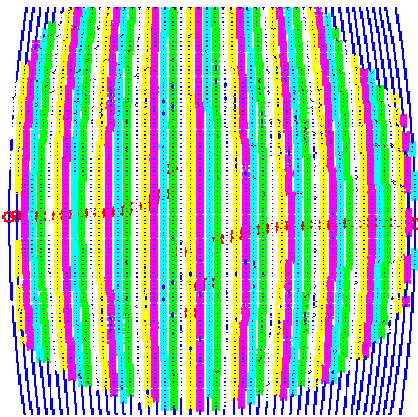


Figura 5 – Pixels identificados e parábolas que estes determinam para descrição das linhas verticais

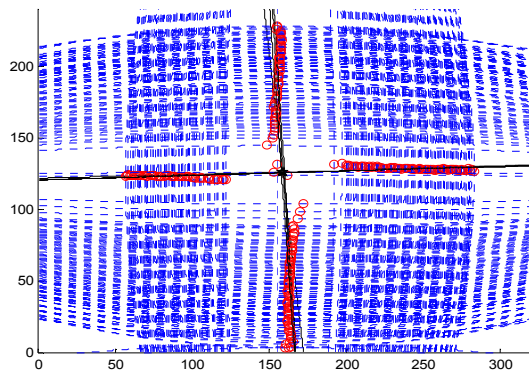


Figura 6 – Determinação do Pixel Central pela sobreposição de todos os resultados obtidos.

- v. Realizada uma regressão linear dos pontos de inflexão, considerando apenas os remanescentes a um processo de

eliminação de erros, se pode determinar as linhas centrais de distorção, tanto vertical quanto horizontal. O cruzamento destas linhas indica o centro de distorção do conjunto de imagens tomadas. Este resultado, computado para todas as imagens processadas é apresentado na Figura 6.

- vi. Tomando os pontos centrais de distorção calculados para todas as imagens processadas, foram determinadas as coordenadas do centro da imagem.

6 RESULTADOS OBTIDOS

As coordenadas do centro da imagem, calculando-se a incerteza para um índice de confiança de ~95% ($k=2$), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados para Coordenadas do Centro Óptico

	Centro	Incerteza ($k = 2$)
Eixo Horizontal	159,8 pixels	$\pm 0,24$ pixels
Eixo Vertical	125,9 pixels	$\pm 0,48$ pixels

A apresentação dos resultados acima foi realizada utilizando exatidão sub-pixel com o objetivo de prover uma melhor percepção da qualidade atingida, apesar de não haver sentido prático para uso desta informação.

Com base nas parábolas determinadas nos passos descritos anteriormente, a determinação do parâmetro de distorção radial “ k_1 ”, foi realizada diretamente pela inversão da equação (4), calculando-se a distorção em cada sentido (u e v), considerando os seguintes critérios.

- i. Para valores de u e v próximos ao centro previamente computado, a distorção em cada eixo é desprezível.
- ii. O espaçamento constante entre as linhas e colunas definidas pelo padrão produz, quando considerada uma pequena região, espaçamentos aproximadamente constantes para as linhas e colunas na imagem (considera-se para tal uma perpendicularidade aproximada entre o eixo óptico e o plano definido pela tela TFT-LCD).
- iii. Retas paralelas a um dos eixos da imagem apresentam distorção apenas em seu coeficiente linear nos pontos de cruzamento com outro eixo.

Os coeficientes lineares para as retas esperadas em uma imagem sem distorção podem portanto ser estimado considerando os critérios i e ii. O critério iii nos permite uma aproximação dos coeficientes angulares esperados.

A diferença entre as retas estimadas e as retas identificadas na forma de parábolas definidas na imagem, provê diretamente estimativas para os valores de δ_u e δ_v , permitindo portanto a estimação do parâmetro k_1 (aproximadamente $1,3 \times 10^{-5}$).

A utilização dos modelos de distorção apresentados no item 2.2 permite a retificação de imagens produzidas pela câmera ensaiada, que passa a se comportar de forma mais semelhante ao modelo “pin hole” em eventuais etapas de processamento posteriores. Um exemplo de aplicação do algoritmo proposto é apresentado nas figuras a seguir.

Observe ajustes realizados na régua, câmera e lateral da mesa e outros objetos, que corrigem as distorções verificadas na Figura 7.



Figura 7 – Imagem exemplo para verificação qualitativa da efetividade do procedimento adotado..



Figura 8 – Imagem exemplo corrigida.

7 CONCLUSÃO

Neste artigo propomos uma metodologia alternativa para calibração de câmeras utilizadas em sistemas de visão computacional. Esta técnica, baseada no uso de monitores TFT-LCD para geração dinâmica dos padrões de calibração permite a calibração de parâmetros intrínsecos da câmera, associados essencialmente às distorções radiais proveniente das lentes.

A abundância de dados coletados através do método proposto, em contraposição ao normalmente disponível com o método de linha de prumo em sua forma original, possibilita a expansão deste para determinação dos demais parâmetros intrínsecos não explorados neste artigo. Os fatores de escala, por exemplo, podem ser derivados das diferenças entre os coeficientes de distorção horizontal e vertical.

Espera-se que tal dinamicidade propicie, ainda, uma forma eficiente e ágil para avaliação das não linearidades no processo de geração de imagens como um todo, possibilitando a determinação estatisticamente mais confiável das diferentes fontes de incerteza e erro no processo de aquisição de imagens.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se fazer uma avaliação mais detalhada dos parâmetros apontados, todavia não devidamente explorados neste artigo, incluindo uma comparação mais minuciosa do procedimento proposto com outros procedimentos tradicionalmente utilizados

Acredita-se portanto que o principal interesse para o procedimento proposto encontra-se no fato de que, não

tomando qualquer referência preliminar, pode com sucesso prover parâmetros críticos para aprimoramento da qualidade dos resultados obtidos em sistemas de visão. Tal possibilidade é especialmente interessante ao considerarmos, por exemplo, procedimentos de auto-calibração, conforme apresentado Azarbajejani e Pentland (1995), que, apesar do “baixo custo” operacional para realização, normalmente desconsideram as distorções tratadas neste artigo, o que compromete significativamente a qualidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Ask, R. E. (1952). *Manual of Photogrammetry*. 2ª edição, American Society of Photogrammetry, EUA
- Azarbajejani, A., Pentland, A. (1995). Camera self-calibration from one point correspondence. *Perceptual Computing Tech. Report #341*, MIT Media Laboratory, Cambridge, EUA.
- Batista, J., Araújo, H., Almeida, A. T. (1999). Interactive multistep explicit câmera calibration. *IEEE Trans. On Robotics and Automation (Outubro)*, Vol 15, No 5, pp 897-917.
- Heikkilä, J., Silvén, O. (1996). Calibration Procedure for Short Focal Length Off-the-Shelf CCD Cameras. *IEEE Proceedings of ICPR*, pp 166-170.
- Lenz, R. K., Tsai, R. Y. (1988). Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Setembro)*, Vol. 10, No 5, pp 713-720.
- Shen, T., Menq, C. (2001). Automatic camera calibration for a multiple-sensor integrated coordinate measurement system. *IEEE Trans. on Robotics and Automation (Agosto)*, Vol: 17 No 4, pp 502 – 507
- Stein, G. P. (1997). Lens Distortion Calibration Using Point Correspondences. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp 602-609.
- Tsai, R. Y. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE J. Robotics Automation (Agosto)*, Vol. RA-3, no 4, pp 323-344.
- Tsatsakis, I. Kayafas, E. Loumos, V. Cambourakis, G. (1995). Using low cost video cameras in automation: a close range photogrammetry approach. *Proc. IEEE Inter. Sym. on Industrial Electronics – ISIE*, Athens, Greece, pp 523 - 528 vol.2
- Tu, X., Dubuisson, B. (1992). CCD camera model and its physical characteristics. Consideration in calibration task for robotics. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tokyo, Japan, pp 75-77.
- Valkenburg, R. J., Evans, P. L. (2002). Lens Distortion Calibration by Straightening Lines. *Proc. Image and Vision Computing*, New Zeland, pp 65-69.
- Weng, J., Cohen, P., Hermiou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence (Outubro)*, Vol 14, no 10, pp 965-980.
- Whitmore, G. D. (1952). *Manual of Photogrammetry*. 2a edição, American Society of Photogrammetry, EUA