

THỰC HIỆN HIỆU CHỈNH CAMERA ĐỂ KHỬ HIỆN TƯỢNG MÉO ẢNH TRONG CÁC PHÉP ĐO KÍCH THƯỚC SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ THỊ GIÁC MÁY

Đào Xuân Phúc^{}, Nguyễn Thị Phi Doan[†], Nguyễn Thống Nhất[‡]*

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 02/12/2022

Ngày nhận kết quả phản biện đánh giá: 02/06/2023

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/06/2023

DOI: 10.59266/houjs.2023.273

Tóm tắt: Bài báo này sẽ trình bày việc thực hiện hiệu chỉnh camera để khử hiện tượng méo ảnh do sự biến dạng ống kính quang học (lens) gây ra và đánh giá kết quả của việc thực hiện đó trong triển khai thực tế. Để thực hiện hiệu chỉnh camera, bài báo sẽ xây dựng mô hình toán học của camera và sử dụng mô hình đó để kiểm tra với thiết bị thực.

Từ khóa: thị giác máy, biến dạng ống kính, hiệu chỉnh camera.

I. Đặt vấn đề

Ngày nay thị giác máy đã có những bước phát triển vượt bậc và được coi là nhân tố then chốt trong thời đại công nghiệp 4.0. Công nghệ thị giác máy được ứng dụng hầu hết trong các ngành sản xuất công nghiệp như cơ khí, dược phẩm, đóng gói, thực phẩm... Một trong những ứng dụng phổ biến của thị giác máy trong công nghiệp đó là đo kiểm tra kích thước của các sản phẩm. Trong các thiết bị đo kích thước sử dụng công nghệ thị giác máy, các hình ảnh thu được từ camera thường bị méo dưới tác động của hiệu ứng méo xuyên tâm của ống kính quang học dẫn tới kết quả đo không

chính xác. Ngay cả với các thiết bị đo có camera sử dụng các ống kính Telecentric thì vẫn có hiện tượng méo ảnh nhất định. Vì thế, để các thiết bị đo sử dụng công nghệ thị giác máy đạt kết quả cao, bắt buộc phải thực hiện hiệu chỉnh camera để khử hiệu ứng méo hình ảnh này.

II. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Camera lỗ kim và mô hình toán học

2.1.1. Mô hình camera lỗ kim

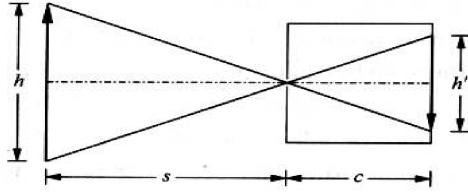
Nếu chúng ta bỏ qua bản chất sóng của ánh sáng, chúng ta có thể coi ánh sáng

^{*} Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội

[†] Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội

[‡] Trung tâm Đào tạo Trực tuyến, Trường Đại học Mở Hà Nội

là các tia lan truyền theo đường thẳng trong một môi trường đồng nhất. Khi đó, mô hình ảnh được tạo bởi camera theo mô hình camera lỗ kim như trong hình 1.



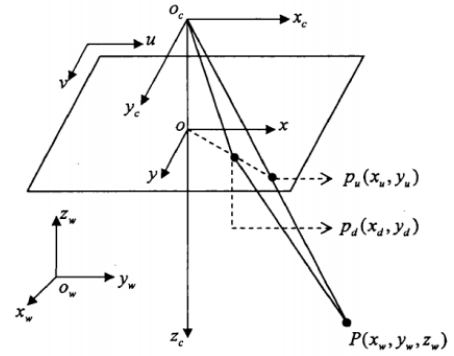
Hình 1. Mô hình camera lỗ kim

Đối tượng ở bên trái được thể hiện trên mặt phẳng ảnh ở bên phải. Lỗ kim đóng vai trò như tâm chiếu. Camera lỗ kim sẽ tạo ra ảnh ngược chiều với ảnh của đối tượng. Với mục đích đo lường các đối tượng trong các tọa độ thông qua hiệu chỉnh camera, mô hình camera lỗ kim đơn giản ở trên gần như là có thể đáp ứng được. Tuy nhiên mô hình này không phản ánh thực tế bởi vì lỗ kim nhỏ, rất ít ánh sáng thực tế có thể đi tới mặt phẳng ảnh vì thế phải cần thời gian phơi sáng nhiều để có được ảnh đầy đủ. Vì vậy các camera trong thực tế sử dụng các ống kính (lens) để hội tụ ánh sáng vào ảnh. Mô hình của ống kính và ảnh hưởng của nó được mô tả trong mục 3 dưới đây.

2.1.2. Mô hình toán học của camera lỗ kim

Các hệ tọa độ trong mô hình camera lỗ kim:

Như trong hình 2, mô hình camera lỗ kim bao gồm bốn hệ tọa độ: hệ tọa độ thế giới (WCS – World Coordinate System), hệ tọa độ camera (CCS – Camera Coordinate System); hệ tọa độ ảnh uv (ICS – Image Coordinate System); hệ tọa độ mặt phẳng ảnh oxy (IPCS – Image Plane Coordinate System).



Hình 2. Các hệ tọa độ trong mô hình camera lỗ kim

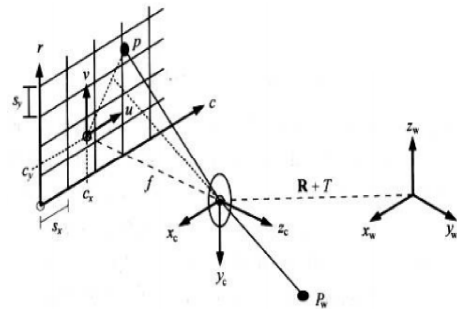
Thực hiện phép chiếu các điểm trong WCS sang ICS:

Đối với các mô hình camera, ánh xạ các điểm 3D (tọa độ thế giới) sang 2D (tọa độ điểm ảnh) được thực hiện bởi camera có thể được thực hiện bởi phép chiếu:

$$p = \pi(P_w, c_1, \dots, c_n) \quad (1)$$

Ở đây p (trong mặt phẳng ảnh) là ảnh của P_w trong hệ tọa độ thế giới được tạo ra bởi phép chiếu π , c_1, \dots, c_n là các tham số của camera.

Hình 3 mô tả phép chiếu phối cảnh được thực hiện bởi camera, điểm P_w được chiếu thông qua tâm chiếu của ống kính tới điểm p trong mặt phẳng ảnh. Nếu không có hiệu ứng méo ảnh do ống kính thì điểm p sẽ nằm trên đường thẳng từ P_w đi qua tâm chiếu. Nhưng vì có hiện tượng méo ảnh do ống kính nên điểm p sẽ nằm ở vị trí khác (sẽ xét trong mục 3).



Hình 3. Phép chiếu phối cảnh theo mô hình camera lỗ kim

Để thực hiện phép chiếu các điểm trong tọa độ WCS sang tọa độ ICS, thực hiện các bước sau:

Bước 1: Biến đổi các điểm trong hệ tọa độ thế giới sang hệ tọa độ camera. CCS được định nghĩa sao cho các trục x và y của nó song song với các cột và các hàng của ảnh và trục z vuông góc với mặt phẳng ảnh và được hướng sao cho các điểm ở đằng trước của camera có các giá trị z

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Sáu tham số $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ được gọi là các tham số bên ngoài của camera bởi vì nó xác định vị trí của camera trong không gian thế giới.

Bước 2: Biến đổi các điểm trong CCS sang IPCS được thực hiện như sau:

$$\begin{cases} u = f_x \frac{x_c}{z_c} \\ v = f_y \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (3)$$

Bước 3: Biến đổi các điểm trong IPCS sang ICS được thực hiện như sau:

$$\begin{cases} c = \frac{u}{S_x} + C_x \\ r = \frac{v}{S_y} + C_y \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: (C_x, C_y) là tâm ảnh; (S_x, S_y) là kích thước điểm ảnh theo tọa độ x, y.

2.2. Ống kính (lens) và hiện tượng méo ảnh

Như mô tả trong hình 3, nếu không có hiện tượng méo ảnh do ống kính thì điểm p sẽ nằm trên đường thẳng từ P_w đi qua tâm quang. Thực tế có hiện tượng méo ảnh do ống kính nên p sẽ nằm ở vị trí khác. Méo ảnh do ống kính là một phép biến đổi có thể được mô hình hóa trong mặt phẳng ảnh.

Phương pháp biến đổi từ WCS sang CCS là kết quả của phép tịnh tiến và phép quay. Điểm $P_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ trong không gian WCS chuyển thành điểm $P_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ trong không gian CCS:

$$P_c = R \cdot P_w + T \quad (2)$$

Ở đây $T = (t_x, t_y, t_z)^T$ là véc tơ tịnh tiến và $R = R(\alpha, \beta, \gamma)$ là ma trận quay với α, β, γ lần lượt là các góc quay quanh các trục x, y, z của CCS

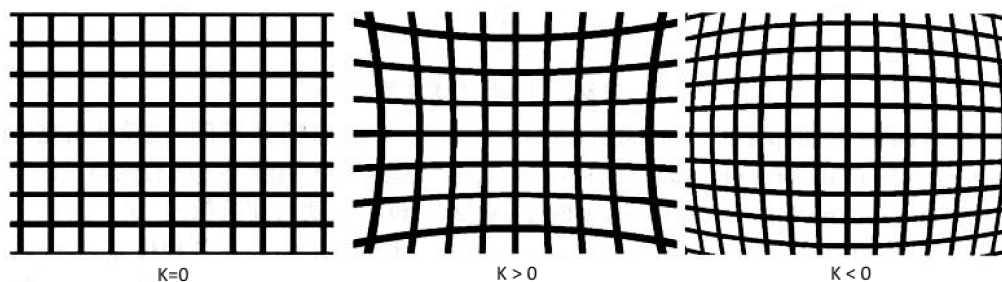
Với đa số các ống kính, sự biến dạng ống kính được xấp xỉ theo mô hình méo xuyên tâm [4, 5] được mô tả như sau:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4k(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (5)$$

Với (x_d, y_d) điểm ảnh sau khi đã được hiệu chỉnh, tham số k mô hình hóa biên độ của méo xuyên tâm. Nếu $k < 0$ thì méo là méo hình cong lõm; $k > 0$ thì méo là méo hình cong lồi; $k = 0$ không tồn tại biến dạng. Khi đó (3a) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} c = \frac{1}{S_x} x_d + C_x \\ r = \frac{1}{S_y} y_d + C_y \end{cases} \quad (6)$$

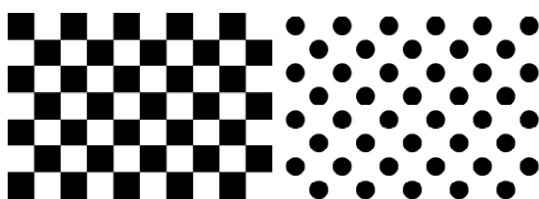
Ở trên, (S_x, S_y, C_x, C_y) là các tham số mô hình tuyến tính và k là tham số biến dạng ống kính phi tuyến. Với mô hình camera lỗ kim, đây là phép chiếu vuông góc của tâm chiếu lên mặt phẳng ảnh, điểm này cũng là tâm của các biến dạng xuyên tâm. Các tham số $(f, k, S_x, S_y, C_x, C_y)$ của camera lỗ kim được gọi là các tham số trong của camera bởi vì chúng xác định phép chiếu từ không gian 3D sang không gian 2D được thực hiện bởi camera. Các tham số $(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z)$ được gọi là các tham số ngoài của camera, nó mô tả vị trí của camera với hệ tọa độ WCS.



Hình 4. Mô hình méo xuyên tâm với hệ số K

2.3. Hiệu chỉnh camera

Như vậy có thể thấy, quá trình hiệu chỉnh camera là quá trình hiệu chỉnh các tham số trong và ngoài của camera để từ đó ta hiệu chỉnh lại ảnh. Để thực hiện hiệu chỉnh, cần thiết phải biết vị trí của một lượng đủ lớn các điểm 3D trong hệ tọa độ WCS (các điểm này là biết trước tọa độ, đơn vị đo là mét) đồng thời xác định được sự tương ứng giữa các điểm thế giới và hình chiếu của chúng trong ảnh.



Hình 5. Một số mẫu bảng được sử dụng để hiệu chỉnh camera

Để đáp ứng yêu cầu đầu tiên, thông thường sử dụng các bảng hiệu chỉnh chứa các hình tròn hoặc hình vuông. Góc của các hình vuông (nếu dùng bảng hiệu chỉnh gồm các hình vuông) và tâm của các hình tròn (nếu dùng bảng hiệu chỉnh gồm các hình

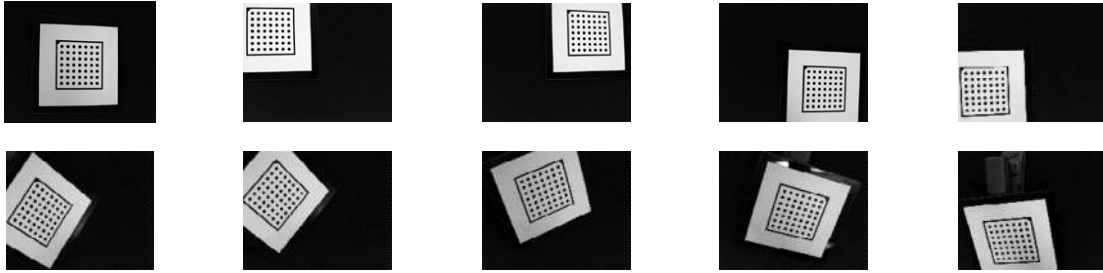
tròn) được gọi là các điểm điều khiển. Các hình vuông hoặc hình tròn được thiết kế một cách chính xác, vị trí của các điểm điều khiển phải được biết trước trong hệ tọa độ WCS. Với yêu cầu thứ hai, cần thiết phải xác định được sự tương ứng của các điểm trong WCS đã biết trước và các hình chiếu của chúng trong ảnh. Thông thường đây là vấn đề khó, vì thế bảng hiệu chỉnh phải được cấu tạo sao cho việc tìm kiếm các điểm tương đồng được thực hiện dễ dàng. Nhóm tác giả lựa chọn sử dụng bảng hiệu chỉnh phẳng gồm $m \times n$ các hình tròn (hình 6). Loại bảng điều khiển có nhiều thuận lợi như nó có thể được sử dụng dễ dàng, có thể thiết kế một cách chính xác (cỡ micro mét). Các hình tròn được sử dụng trong bảng hiệu chỉnh vì các điểm tâm của nó có thể được xác định với độ chính xác cao. Bảng hiệu chỉnh được thiết kế với các hình tròn màu đen nằm trên nền có mức xám lớn hơn 100 (lựa chọn theo kinh nghiệm nhằm giảm bớt lượng tính toán). Các hình tròn có kích thước bằng nhau được đặt cách nhau một khoảng cách bằng nhau và nằm trong một hình bao chữ nhật.

	Các thông số	
	Kích thước	0.08m x 0.08 m
	Số hàng	7
	Số cột	7
	Số điểm điều khiển	49
	Đường kính hình tròn	0.005m
	Khoảng cách giữa hai hình tròn (dọc & ngang)	0.01m

Hình 6. Bảng hiệu chỉnh được sử dụng để hiệu chỉnh camera

Môi trường thực hiện việc hiệu chỉnh camera được thiết kế sao cho không ảnh hưởng tới quá trình xác định bảng hiệu chỉnh trong ảnh. Thực nghiệm cho thấy nên lựa chọn môi trường làm nền có màu đồng nhất (đơn sắc). Tiếp theo quá trình phân đoạn ảnh bằng cách lấy ngưỡng, thực hiện một số thao tác phát hiện biên [1] để làm nổi bật bảng hiệu chỉnh cũng như các hình tròn trong bảng. Mục đích là để tìm tâm hình chiếu của các hình tròn trong ảnh. Hình chiếu của hình tròn trong không gian lên ảnh sẽ không phải là hình tròn mà là hình ê-líp. Vì thế, sử dụng thuật toán khớp ê-líp [6] để xác định các tâm ê-líp. Nếu không tồn tại biến dạng ống kính thì hình chiếu của các tâm hình tròn trong WCS trùng với tâm các ê-líp được tìm thấy trong

ảnh, tuy nhiên vì tồn tại sự biến dạng ống kính nên chúng không trùng nhau. Vì thế cần phải hiệu chỉnh các tham số của camera ở mục 2 và 3 để chúng trùng nhau trong ảnh. Việc thực hiện hiệu chỉnh camera với yêu cầu là hệ tọa độ WCS được đặt trên bảng hiệu chỉnh (mặt phẳng $z = 0$), gốc tọa độ WCS được đặt tại tâm của hình tròn trong bảng hiệu chỉnh sao cho các trục x , y của WCS được sắp đặt cùng hướng với hàng và cột của các hình tròn trên bảng hiệu chỉnh. Trục z của WCS là cùng hướng với trục quang nếu bảng hiệu chỉnh song song với mặt phẳng ảnh. Việc hiệu chỉnh camera được thực hiện bằng cách di chuyển bảng hiệu chỉnh ở đằng trước camera ở các vị trí khác nhau sao cho các hình tròn nằm trọn trong vùng nhìn thấy của camera.



Hình 7. Các hình ảnh của bảng hiệu chỉnh ở các vị trí khác nhau

Thực nghiệm cho thấy càng nhiều điểm điều khiển sẽ cho kết quả chính xác hơn tuy nhiên sẽ mất nhiều thời gian tính toán hơn. Gọi θ là véc tơ chứa các tham số trong và ngoài của mô hình camera:

$$\theta = F(f, k, C_x, C_y, S_x, S_y, \alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z) \quad (7)$$

Khi đó các tham số của mô hình camera được xác định bằng việc tối ưu khoảng cách giữa các tâm ê-líp thứ i ở ảnh thứ j là $m_{i,j}$ và các hình chiếu của nó $\pi(M_i, \theta)$.

$$d(\theta) = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^k \|m_{i,j} - \pi(M_i, \theta)\|^2 \Rightarrow \min \quad (8)$$

Sau khi thực hiện tối ưu (8), sử dụng các tham số tìm được để hiệu chỉnh lại ảnh do biến dạng ống kính gây ra. Thực hiện lại phép chiếu với các tham số ban đầu và các tham số được tối ưu sẽ tính toán được sai số tọa độ ảnh giữa các tọa độ ảnh mô hình và các tọa độ ảnh thực. Các kết quả hiệu chỉnh camera thực nghiệm được đưa ra trong mục 5

III. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá kết quả hiệu chỉnh camera, nhóm tác giả sử dụng camera với độ phân giải 1280x1024, kích thước điểm ảnh là $5.3\mu m$, ống kính có tiêu cự $f = 13mm$.

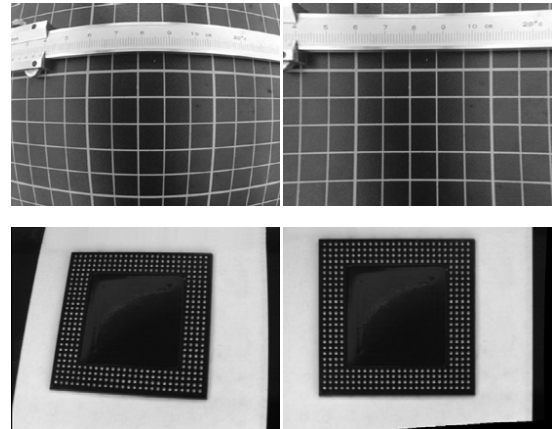
Vì vậy, có thể chọn các giá trị khởi tạo ban đầu cho (8) với $S_x = S_y = 5.3 \times 10^{-6} m$, $C_x = 640$, $C_y = 512$, $f = 13 \times 10^{-3} m$. Khoảng cách làm việc của camera là 200mm, vùng làm việc của camera là 300mmx200mm. Sau khi thực hiện hiệu chỉnh camera với 10 vị trí của bảng hiệu chỉnh (hình 7), kết quả thu được như sau:

Bảng các tham số trong và ngoài của camera sau khi hiệu chỉnh

Kết quả hiệu chỉnh camera			
$f(mm)$	12.7592	x	-58.265
k	-1834.97	y	-32.941
$S_x(\mu m)$	5.298	z	325.408
$S_y(\mu m)$	5.300	()	11.652
$C_x(px)$	659.527		344.882
$C_y(px)$	506.286		0.036

Từ bảng các tham số trên có thể nhận thấy, giá trị của các tham số camera sau hiệu chỉnh (giá trị thực của camera và ống kính) có sự khác biệt với các tham số khởi tạo ban đầu (theo nhà sản xuất). Tọa độ tâm ảnh được dịch chuyển sang một vị trí mới (659.527, 506.286) so với vị trí ban đầu (640, 512); kích thước điểm ảnh có sai số theo trục x là 0.003; tiêu cự của ống kính có sai số là 0.2408mm. Ngoài ra, kết quả hiệu chỉnh còn cho chúng ta biết hệ số méo ảnh k và vị trí của camera trong hệ tọa độ WCS với các giá trị (). Sử dụng các tham số camera được hiệu chỉnh ở trên để hiệu chỉnh ảnh ở (6) ta thu được các ảnh được chuẩn hóa. Các ảnh bị méo bởi hiện tượng biến dạng của ống kính (trước khi hiệu chỉnh) và các ảnh đã được hiệu chỉnh được đưa ra trong hình 8. Cột bên trái của hình 8 là các ảnh trước khi được hiệu chỉnh, cột bên phải là ảnh đã được khử méo do biến dạng ống kính. Kết quả hiệu chỉnh cho thấy hiện tượng méo ảnh

do biến dạng ống kính đã được loại bỏ hoàn toàn khỏi ảnh.



Hình 8. Một số kết quả khử méo ảnh do biến dạng ống kính camera

IV. Kết luận

Như được thể hiện trong hình 8, cột hình ảnh bên trái cho thấy với sự biến dạng của ống kính quang học (lens) sẽ gây ra hiện tượng méo ảnh khi chụp ảnh từ camera. Trong ứng dụng đo kích thước sử dụng công nghệ thị giác máy, nếu phép đo được thực hiện trên các hình ảnh này sẽ cho kết quả không chính xác, vì thế cần phải khử hiện tượng méo ảnh này. Bằng sử dụng các kỹ thuật xử lý ảnh, nhóm tác giả đã thực hiện thành công khử méo ảnh (cột bên phải của hình 8) dựa trên mô hình toán học của camera. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng để đảm bảo phép đo kích thước sử dụng công nghệ thị giác máy đạt độ chính xác cao.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. John Canny, "A computational approach to edge detection", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. PAMI-8, 1986
- [2]. Lanser, S., Zierl, C., Beutlhauser, R.: Multibildkalibrierung einer CCD-Kamera. In: Sagerer, G., Posch, S.,

- Kummert, F. (eds.) Mus-tererkennung, Informatik aktuell, pp. 481-491. Springer, Berlin (1995)
- [3]. Lenhardt, K.: Optical systems in machine vision. In: Hornberg, A. (ed.) Handbook of Machine and Computer Vision, 2nd edn, pp.179-290. Wiley-VCH, Weinheim (2017)
- [4]. Lenz, R.: Lens distortion corrected CCD-camera calibration with coplanar calibration points for real-time 3D measurements. In: ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, pp. 60-67 (1987)
- [5]. Lenz, R., Fritsch, D.: Accuracy of videometry with CCD sensors. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 45(2), 90-110 (1990)
- [6]. Fitzgibbon, A., Pilu, M., & Fisher, R.B. (1990). "Direct least square fitting of ellipses". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(5), 476-480

IMPLEMENTING CAMERA CALIBRATION IN DIMENSION MEASUREMENTS USING MACHINE VISION TECHNOLOGY

Dao Xuan Phuc[§], Nguyen Thi Phi Doan[¶], Nguyen Thong Nhat^{**}
Email: phucdx@hou.edu.vn

Abstract: This paper will present the implementation of camera calibration to eliminate image distortion due to lens distortion and evaluate the results of such implementation. To implement camera calibration, the paper will build a mathematical model of the camera and use that model to test calibration with real devices.

Keywords: machine vision, lens distortion, camera calibration

[§] Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Hanoi Open University

[¶] Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Hanoi Open University

^{**} E-Learning Center, Hanoi Open University