

ẢNH HƯỞNG CỦA ÁNH SÁNG MÔI TRƯỜNG ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC HIỆU CHUẨN HỆ THỐNG ĐO 3D BẰNG ÁNH SÁNG MÃ DỊCH PHA KẾT HỢP MÃ GRAY

Nguyễn Thị Kim Cúc^{1*}, Nguyễn Văn Vinh¹, Ngô Anh Vũ², Nguyễn Việt Kiên¹

Tóm tắt: Hiệu chuẩn là một quá trình rất quan trọng đối với một hệ thống đo 3D bằng ánh sáng mã dịch pha kết hợp mã Gray. Để thu được một kết quả đo chính xác thì hệ thống đo phải được hiệu chuẩn tốt. Quá trình hiệu chuẩn phụ thuộc vào nhiều yếu tố: các thông số của hệ thống, ánh sáng môi trường xung quanh... Bài báo này quan tâm đến ảnh hưởng của ánh sáng môi trường đến kết quả hiệu chuẩn. Hệ thống thực nghiệm được hiệu chuẩn ở 13 mức độ rọi của ánh sáng môi trường từ 0 đến 360 lux lên bề mặt băng hiệu chuẩn. Kết quả thực nghiệm đã xác định được quan hệ của ánh sáng môi trường và kết quả hiệu chuẩn. Kết quả thực nghiệm đã chỉ ra trong quá trình đo nếu điều chỉnh được độ rọi của ánh sáng môi trường nằm trong khoảng từ 100 đến 200 lux thì sai lệch hiệu chuẩn hệ thống đạt được giá trị nhỏ nhất.

Từ khóa: Hiệu chuẩn hệ thống, Đo 3D bằng ánh sáng cấu trúc, Mã dịch pha kết hợp Gray.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, phương pháp đo 3D quang học biên dạng bề mặt bằng ánh sáng cấu trúc đang được thế giới quan tâm nghiên cứu, phát triển và ứng dụng rộng rãi. Nguyên lý của phương pháp đo 3D bằng ánh sáng cấu trúc là ánh sáng được mã hóa theo hàm cường độ hoặc màu sắc theo không gian và thời gian lên bề mặt vật thể cần đo. Chùm ánh sáng mã hóa được chiếu lên khung hình được gọi là ảnh mẫu ánh sáng. Ảnh mẫu ánh sáng xuất hiện trên bề mặt 3D chi tiết đo được thu lại bởi hệ thống máy ảnh. Sự biến dạng của ảnh mẫu ánh sáng trên chi tiết so với ảnh mẫu ánh sáng cho phép xác định được tọa độ của các điểm trên bề mặt chi tiết thông qua phương pháp tam giác lượng [1]. Mối tương quan về vị trí hình học giữa máy ảnh và máy chiếu so với đối tượng đo được hiệu chuẩn chính xác. Với sự tiến bộ của khoa học kỹ thuật và công nghệ máy tính, phương pháp đo biên dạng 3D quang học ngày càng trở nên dễ dàng hơn, tốc độ đo và độ chính xác ngày càng cao, có thể đo nhiều chi tiết cùng lúc. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn nhiều hạn chế do ảnh hưởng của nhiều yếu tố đến quá trình giải mã ánh sáng như: đặc tính bề mặt đối tượng đo, các thông số của hệ thống quang học, quang sai, phương pháp hiệu chuẩn, cường độ sáng nền hay nhiễu môi trường. Các yếu tố này sẽ ảnh hưởng đến quá trình dựng lại biên dạng đối tượng đo. Để giảm thiểu các sai số trong quá trình đo cần phải hiệu chuẩn hệ thống trước khi đo. Mục đích của hiệu chuẩn là xác định được sai lệch giữa hệ thống thực so với hệ thống lý tưởng. Thông số hiệu chuẩn được xác định với các nội thông số và ngoại thông số càng chính xác kết quả đo thu được sẽ càng chính xác.

Để xác định mối quan hệ của các điểm trên tọa độ thực và ảnh thu được dùng hai thông số chính là: cường độ sáng và tọa độ điểm ảnh. Cường độ sáng của các điểm ảnh phụ thuộc vào cường độ sáng của nguồn chiếu, hệ số phản xạ của bề mặt đối tượng đo và cường độ ánh sáng môi trường xung quanh. Độ chính xác của tọa độ điểm ảnh phụ thuộc vào độ chính xác của các thông số quang sai hệ quang [2]. Các nghiên cứu được công bố trên thế giới đã chứng minh một số yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác hiệu chuẩn, nhưng yếu tố ảnh hưởng của ánh sáng môi trường chưa được đề cập rõ ràng và cụ thể [2]. Trong bài báo này, ánh sáng môi trường được xác định là có ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác hiệu chuẩn thông qua các sai số hiệu chuẩn và hệ số méo ảnh.

2. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG

Để xác định sự ảnh hưởng của ánh sáng môi trường tới độ chính xác hiệu chuẩn hệ thống cần phải hiểu hình ảnh vật thể hình thành trên cảm biến của máy ảnh thế nào thông qua cường độ sáng và các thông số ảnh hưởng đến độ chính xác của tọa độ điểm ảnh thu được.

2.1. Nguyên lý dịch pha kết hợp Gray

Nguyên lý của phương pháp dịch pha là chiếu tuần tự mẫu chiếu ánh sáng theo hàm cường độ và dịch pha với chu kỳ T . Các hướng chiếu được mã hóa theo giá trị pha [3]:

$$I_i(x, y, t) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos [\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (1)$$

Trong đó: $I_i(x, y, t)$ là cường độ sáng của các ảnh mẫu chiếu được chiếu bằng máy chiếu; $I'(x, y)$ là cường độ ánh sáng nền; $I''(x, y)$ là cường độ ánh sáng điều biến; $\phi(x, y)$ bản đồ pha của sóng; $\delta(t) = \frac{2\pi}{4}t$ là hằng số góc dịch pha, $i=1, 2, 3, 4$ là thứ tự mã dịch pha. Giải phương trình với dịch pha 4 bước của ảnh pha thu được giá trị pha tương đối như sau:

$$\phi_w(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (2)$$

Theo công thức (2) hàm arctan gián đoạn theo chu kỳ $-\pi$ đến $+\pi$, dùng thuật toán Gray để gỡ pha thời gian loại bỏ sự gián đoạn pha $(-\pi, +\pi)$. Phương pháp Gray cho phép mô tả 2^n hướng chiếu khác nhau của máy chiếu. Với n mã Gray, không gian đo được chia thành 2^n không gian con duy nhất có giá trị k_G [4], một chu kỳ mã dịch pha tương ứng với một mã Gray duy nhất. Việc kết hợp mã Gray sẽ đơn giản hóa quá trình gỡ pha bằng cách xác định vị trí gián đoạn và sau đó di chuyển chúng bằng cách thêm hoặc bớt đi một lượng k_G modul pha từ quá trình gỡ pha tương đối. Pha tuyệt đối có thể xác định thông qua gỡ pha bằng mã Gray [5] được thể hiện thông qua công thức sau:

$$\Phi_c = 2\pi k_G + \Phi_w \quad (3)$$

Pha liên tục Φ_c sau đó có thể được sử dụng để xây dựng lại tọa độ (x, y, z) của chi tiết đo.

Giả sử cường độ sáng thu được bằng máy ảnh là $I_c(x, y)$ và cường độ sáng chiếu từ máy chiếu là $I_p(x, y)$. Trong hệ thống sử dụng ánh sáng mã dịch pha và Gray các yếu tố ảnh hưởng đến sự hình thành các vân của ảnh bao gồm: (1) Ánh sáng môi trường xung quanh chiếu trực tiếp đến cảm biến ảnh với cường độ I_m ; (2) Ánh sáng xung quanh và ánh sáng chiếu từ các phần bề mặt khác có hệ số phản xạ R_b tới bề mặt đối tượng $I_r = (I_m + R_b I_p)$; (3) Ánh sáng cấu trúc với cường độ I_p chiếu từ máy chiếu và phản xạ từ các phần bề mặt đối tượng có hệ số phản xạ R_a tương ứng là $R_a I_p$. Giả sử độ phơi sáng t của máy ảnh được giữ không đổi trong quá trình đo. Cường độ sáng của ảnh $I_c(x, y)$ có mối quan hệ tuyến tính với hệ số phản xạ như vậy độ nhạy ξ của cảm biến ảnh cũng sẽ không đổi. Cường độ ánh sáng mà một phần tử ảnh thu được từ một điểm có hệ số phản xạ R_a trên đối tượng đo được trình bày trong phương trình sau [6]:

$$I_c = t\xi [R_a I_p (1 + R_b) + I_m (R_a + 1)] \quad (4)$$

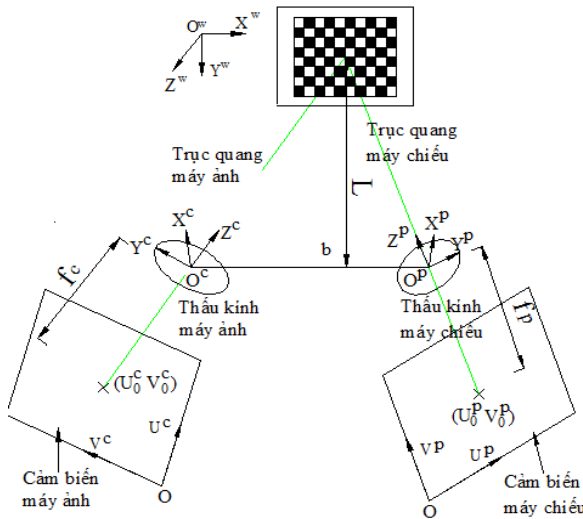
Phương trình (4) cho thấy cường độ ánh sáng thu được của một điểm ảnh đo phụ thuộc vào cường độ chiếu sáng của máy chiếu tới bề mặt đối tượng I_p , cường độ ánh sáng từ các vùng xung quanh của đối tượng phản xạ đến máy ảnh và cường độ ánh sáng môi trường chiếu trực tiếp vào cảm biến ảnh I_m . Để đơn giản phương trình (4) giả sử các thông số

cường độ I_p của máy chiếu là cố định, đặc tính phản xạ của bề mặt đối tượng đo R_a cũng không đổi trong quá trình đo. Trong phương trình (4) chỉ xét đến ảnh hưởng của I_m đến I_c . Thông số I_m càng ổn định thì I_c càng ổn định. Tuy nhiên, giá trị của thông số I_m ổn định trong mức nào thì thu được kết quả hiệu chuẩn tốt nhất thì chưa được nghiên cứu. Trong nghiên cứu này sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của ánh sáng môi trường chiếu trực tiếp vào máy ảnh thông qua độ chính xác của các thông số hiệu chuẩn và độ chính xác hình dạng đối tượng đo. Các kết quả hiệu chuẩn sẽ được thu và phân tích đánh giá trong điều kiện ánh sáng môi trường thay đổi từ 0 đến 360 lux.

2.2. Hiệu chuẩn hệ thống

Một hệ thống đo chính xác yêu cầu phải được hiệu chuẩn chính xác. Quá trình hiệu chuẩn là quá trình xác định các nội thông số bao gồm chiều dài tiêu cự, hệ số độ nghiêng điểm ảnh, tọa độ tâm của cảm biến kích thước điểm ảnh và ngoại thông số là ma trận quay R và véc tơ tịnh tiến \vec{t} của hệ tọa độ máy ảnh $\{o^c; x^c, y^c, z^c\}$ sang hệ tọa độ máy chiếu $\{o^p; x^p, y^p, z^p\}$. Hiệu chuẩn xác định được càng nhiều thông số và chính xác thì hệ thống hoạt động càng chính xác.

Để hiệu chuẩn các thông số của hệ thống, phương pháp hiệu chuẩn của Zhang [7] được đề xuất sử dụng. Theo phương pháp hiệu chuẩn này máy ảnh được mô tả bởi mô hình lỗ nhỏ có tính đến quang sai với nội thông số và ngoại thông số. Hình 1 mô tả hệ tọa độ hệ thống được thiết lập dựa trên bảng hiệu chuẩn trên mặt phẳng $o^w x^w y^w$. Trong hệ thống này máy chiếu cũng được coi là một mô hình máy ảnh ngược nên việc hiệu chuẩn các thông số



Hình 1. Sơ đồ quang của hệ thống đo.

của máy chiếu cũng tương tự như hiệu chuẩn máy ảnh. Bảng hiệu chuẩn là một bảng phẳng và được chia thành các ô vuông đen trắng xen kẽ đều nhau. Máy chiếu chiếu ảnh mẫu lên bảng hiệu chuẩn thực, máy ảnh thu lại ảnh của bảng hiệu chuẩn sau đó kiểm tra kích thước và sự thẳng hàng của điểm góc các ô vuông. Nếu kích thước của các ô vuông nằm trong giới hạn cho phép [8] và sự thẳng hàng là tốt, nghĩa là hệ thống được hiệu chuẩn chính xác.

Mối quan hệ giữa một điểm trên vật thể và phép chiếu của nó trên cảm biến ảnh là:

$$s \cdot I = A \cdot [R, \vec{t}] \cdot X^w, \tag{5}$$

Trong đó: s là hệ số tỷ lệ; $I = [u, v, 1]^T$ là tọa độ đồng nhất của điểm ảnh trong hệ tọa độ hình ảnh; A là ma trận nội thông số của máy ảnh và máy chiếu

$$A = \begin{bmatrix} f_u & \gamma & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

Với: (u_0, v_0) là tọa độ của điểm góc; f_u, f_v là chiều dài tiêu cự của máy ảnh dọc theo trục u và v của mặt phẳng ảnh theo đơn vị điểm ảnh; γ là thông số biểu thị độ nghiêng của hai trục hình ảnh; $[R, \vec{t}]$ là ma trận ngoại thông số được thể hiện:

$$R = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \quad \vec{t} = \{t_x \quad t_y \quad t_z\}^T, \quad (7)$$

$X^w = [x^w, y^w, z^w, 1]^T$ là tọa độ của điểm đo.

Tuy nhiên, công thức (5) chỉ đại diện cho mô hình tuyến tính của máy ảnh và máy chiếu. Trong thực tế, các ống kính này có thể tạo ra méo ảnh và mô hình máy ảnh lỗ nhỏ sẽ không đại diện được cho hệ thống đo chính xác nếu không tính đến quang sai méo ảnh của ống kính. Quang sai méo ảnh là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến tỉ lệ tạo ảnh và độ chính xác tạo ảnh trong máy ảnh. Quang sai méo ảnh gồm hệ số méo hướng tâm và hệ số méo hướng kính được hiệu chuẩn thông qua công thức sau:

$$\begin{cases} u' = u + (u - u_0)((k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2)]) \\ v' = v + (v - v_0)((k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2p_1 uv + p_2(r^2 + 2v^2)]) \end{cases} \quad (8)$$

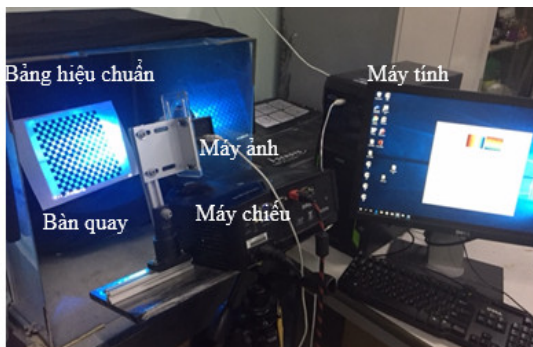
Trong đó: (u, v) và (u', v') biểu thị tọa độ điểm ảnh lý tưởng, tọa độ điểm ảnh thực của máy ảnh và máy chiếu; $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ biểu thị cho khoảng cách tuyệt đối giữa điểm ảnh và điểm góc trên máy ảnh, máy chiếu; k_1, k_2, k_3 là hệ số méo ảnh hướng tâm và p_1, p_2 là hệ số méo ảnh tiếp tuyến của máy ảnh và máy chiếu.

Như vậy, quá trình hiệu chuẩn hệ thống chính là quá trình xác định các hệ số tuyến tính: f_u, f_v, u_0, v_0, R, t và các hệ số phi tuyến: k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 một cách chính xác. Tuy nhiên, quá trình hiệu chuẩn các hệ số này dựa vào cường độ sáng của ảnh I_c và tọa độ của điểm ảnh thu được nên yếu tố ánh sáng môi trường cần được khảo sát để làm giảm ảnh hưởng của nó đến độ chính xác xác định các thông số hệ thống.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Thiết bị đo 3D thực nghiệm sử dụng phương pháp dịch pha kết hợp mã Gray gồm: một máy chiếu InFocus N104 sử dụng công nghệ DLP với độ phân giải (1280×960), một máy ảnh DFK 41BU02 có độ phân giải (1280×960) và một máy tính.

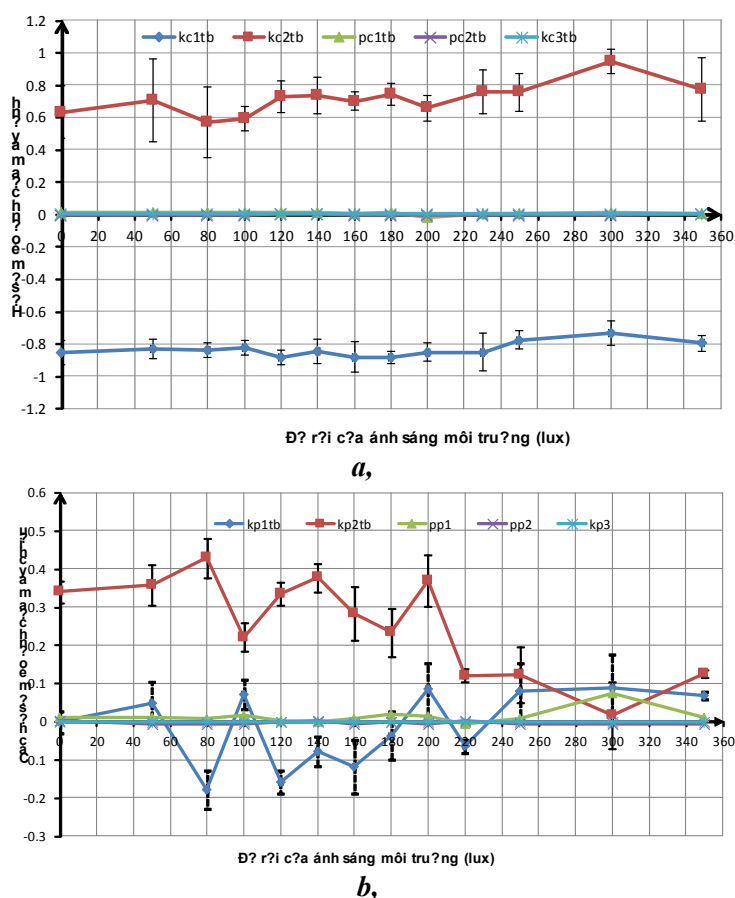
Từ các thông số của máy ảnh, máy chiếu, khoảng cách giữa chúng $b = 130$ mm và khoảng cách đặt vật đo $L = 500$ mm xác định được giới hạn vùng đo Rộng × cao × sâu = 245 × 182 × 90 (mm). Bảng hiệu chuẩn được đặt trong vùng đo với kích thước 180 × 180 mm chia thành 12 × 12 ô vuông đen trắng xen kẽ nhau có kích thước 15 mm.



Hình 2. Hệ thống đo 3D sử dụng ánh sáng mã dịch pha kết hợp Gray.

Thực nghiệm với sự thay đổi giá trị độ rọi do ánh sáng môi trường xung quanh lên bảng hiệu chuẩn trong mỗi lần hiệu chuẩn và được lặp lại 5 lần. Mỗi lần hiệu chuẩn sử dụng 10 vị trí, góc bất kỳ của bảng hiệu chuẩn nằm trong giới hạn vùng đo. Điều kiện ánh sáng môi trường trong thực nghiệm được xây dựng giống với điều kiện chiếu sáng công nghiệp. Giá trị độ rọi do ánh sáng môi trường được chia thành 13 mức trong khoảng từ 0 đến 360 lux lấy theo tiêu chuẩn chiếu sáng công nghiệp TCVN 7114-1:2008 và được đo bằng Lux kế (LX1010 BS). Các thông số khác như vị trí giữa máy ảnh và máy chiếu, hệ số phóng đại tiêu cự của hai thiết bị không thay đổi.

Kết quả thực nghiệm hiệu chuẩn với mỗi giá trị độ rọi thu được nội thông số, ngoại thông số và các hệ số méo ảnh của hệ thống. Với $k_1^c, k_2^c, k_3^c, p_1^c, p_2^c$ là thông số méo ảnh của máy ảnh được xác định theo công thức (8) trong mỗi lần hiệu chuẩn máy ảnh và giá trị trung bình của 5 lần hiệu chuẩn tương ứng là $k_1^c tb, k_2^c tb, k_3^c tb, p_1^c tb, p_2^c tb$. Với $k_1^p, k_2^p, k_3^p, p_1^p, p_2^p$ là thông số méo ảnh của máy chiếu được xác định theo công thức (8) trong mỗi lần hiệu chuẩn máy chiếu và giá trị trung bình của 5 lần hiệu chuẩn tương ứng là $k_1^p tb, k_2^p tb, k_3^p tb, p_1^p tb, p_2^p tb$. Hình 3 thể hiện mối quan hệ của các thông số méo ảnh trung bình do độ rọi của ánh sáng môi trường.



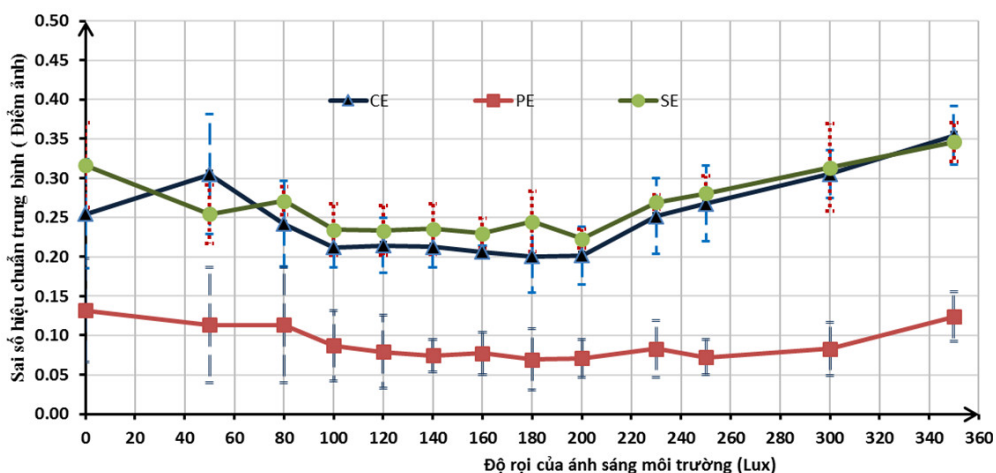
Hình 3. Đồ thị mối quan hệ giữa ánh sáng môi trường xung quanh và các hệ số méo ảnh của máy ảnh a, và máy chiếu b.

Hình 3a biểu thị hệ số méo ảnh hướng tâm và tiếp tuyến trung bình của máy ảnh trong 5 lần hiệu chuẩn so với độ rọi môi trường thay đổi. Hình 3b biểu thị hệ số méo ảnh hướng tâm và tiếp tuyến trung bình của máy chiếu trong 5 lần hiệu chuẩn với độ rọi môi trường thay đổi. Trên đồ thị hình 3a và 3b các thông số méo ảnh hướng tâm bậc 1 và 2 của máy ảnh và máy chiếu: $k_1^c tb, k_2^c tb$, và $k_1^p tb, k_2^p tb$ trên đồ thị thể hiện rõ ảnh hưởng của chúng đến sai lệch hiệu chuẩn của máy ảnh và máy chiếu. Các thông số méo ảnh tiếp tuyến $p_1^c tb, p_2^c tb, p_1^p tb, p_2^p tb$, của máy ảnh và máy chiếu gần bằng 0 chứng tỏ sai số hiệu chuẩn của máy ảnh và máy chiếu không bị ảnh hưởng bởi các thông số này. Theo công

thức (8) thông số k_3^c và k_3^p là hệ số méo hướng tâm bậc cao cũng sấp xỉ bằng 0 nên không ảnh hưởng đến độ chính xác hiệu chuẩn của máy ảnh và máy chiếu.

Kết quả thực nghiệm mối quan hệ giữa sự thay đổi độ rọi ánh sáng môi trường và độ chính xác hiệu chuẩn tổng hợp theo công thức (8) được thiết lập như hình 4. Thông số CE , PE , SE tương ứng biểu thị sai số hiệu chuẩn trung bình của máy ảnh, máy chiếu và hệ thống.

Từ đồ thị hình 4 nhận thấy nếu thay đổi độ rọi từ 0 đến 100 lux và từ 200 đến 360 lux thì độ chính xác hiệu chuẩn cũng biến thiên lớn: CE từ 0.202 đến 0.354 điểm ảnh (pixel); PE từ 0.071 đến 0.132 (điểm ảnh); SE từ 0.222 đến 0.345 (điểm ảnh); Với độ rọi trong khoảng 100 lux đến 200 lux thì sai số hiệu chuẩn biến thiên nhỏ: CE từ 0.202 đến 0.215 (điểm ảnh); PE từ 0.070 đến 0.087 (điểm ảnh); SE từ 0.222 đến 0.244 (điểm ảnh). Như vậy, độ rọi của ánh sáng môi trường có ảnh hưởng đến các thông số quang sai của hệ thống đo mà trong đó sai số chính là quang sai méo ảnh hưởng tâm bậc 1 là k_1 và bậc 2 là k_2 của thấu kính máy ảnh và máy chiếu tính theo công thức (8).



Hình 4. Đồ thị mối quan hệ giữa ánh sáng môi trường xung quanh và độ chính xác hiệu chuẩn.

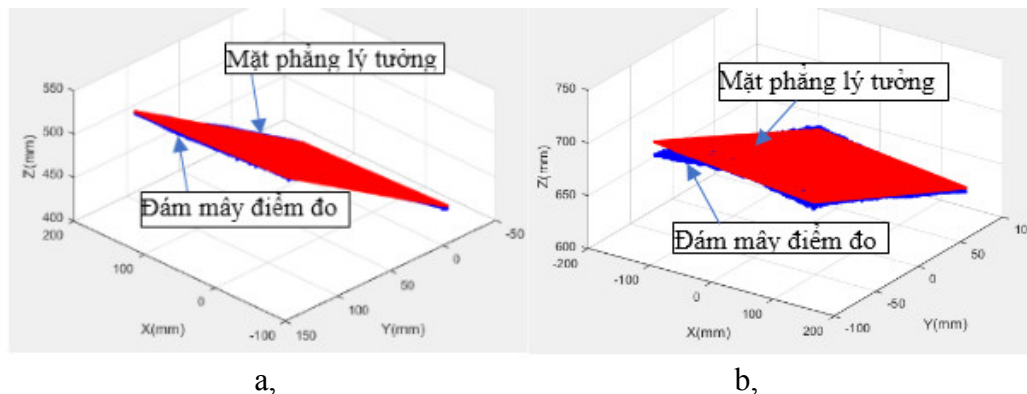
Để kiểm tra độ chính xác hiệu chuẩn ảnh hưởng đến kết quả xây dựng lại biên dạng 3D của chi tiết đo. Từ hình 4 xét hai trường hợp hiệu chuẩn với độ rọi ánh sáng môi trường khác nhau: Trường hợp 1(a) khi độ rọi do ánh sáng môi trường là 160 lux nằm trong vùng sai số hiệu chuẩn biến thiên nhỏ. Trường hợp 2(b) khi độ rọi do ánh sáng môi trường là 300 lux nằm trong vùng sai số hiệu chuẩn biến thiên lớn. Kết quả hiệu chuẩn của hai trường hợp được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Kết quả hiệu chuẩn trong hai trường hợp.

Thông số/ Trường hợp	Sai số hiệu chuẩn		
	Máy ảnh (Điểm ảnh)	Máy chiếu (Điểm ảnh)	Hệ thống (Điểm ảnh)
a	0.206	0.077	0.229
b	0.305	0.083	0.313

Để xác định sai số đo, mặt phẳng lý tưởng được xây dựng phù hợp nhất với đám mây điểm 3D mặt phẳng đã dựng. Kết quả dựng hình mặt phẳng đo và mặt phẳng lý tưởng thể

hiện ở hình 5. Hình 5 là kết quả dựng hình mặt phẳng đo với độ chính xác hiệu chuẩn hệ thống trong hai trường hợp.



Hình 5. Sai lệch bề mặt đo với bề mặt lý tưởng trong hai trường hợp với độ rọi ánh sáng môi trường là 160 lux và 300 lux.

Hình 5 cho thấy độ phẳng của đám mây điểm đo ở độ rọi 160 lux có sai lệch nhỏ khoảng 0.242 mm. Còn đám mây điểm đo trong trường hợp độ rọi là 300 lux có xu hướng cong nhiều về phía xa và có sai lệch 0.432 mm. Chứng tỏ quang sai méo ảnh làm sai lệch kết quả hiệu chuẩn và ảnh hưởng trực tiếp đến tọa độ của các điểm 3D gây sai số dựng hình 3D đám mây điểm.

4. KẾT LUẬN

Thực nghiệm đã chứng minh độ rọi do ánh sáng môi trường có ảnh hưởng tới kết quả hiệu chuẩn. Với giá trị I_p sử dụng trong thí nghiệm nêu trên, khi độ rọi do ánh sáng môi trường nằm trong khoảng 100 lux đến 200 lux thì độ chính xác hiệu chuẩn máy ảnh, máy chiếu, và hệ thống biến thiên nhỏ khoảng 0.017 (điểm ảnh). Độ rọi do ánh sáng môi trường nhỏ hơn 100 lux hoặc lớn hơn 200 lux thì kết quả hiệu chuẩn kém chính xác độ biến thiên lớn hơn 0.062 (điểm ảnh). Kết quả thực nghiệm còn cho thấy trong 5 hệ số méo ảnh được nghiên cứu, hệ số méo ảnh hướng tâm bậc 2 và bậc 4 có ảnh hưởng lớn đến kết quả hiệu chuẩn. Kết quả đo này có thể được sử dụng cho hệ thống đo bằng ánh sáng cấu trúc sử dụng một máy ảnh và một máy chiếu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. Luo, J. Xu, N. Hoa Binh, S. Liu, C. Zhang, and K. Chen, "A simple calibration procedure for structured light system", *Opt. Lasers Eng.*, vol. 57, pp. 6–12, 2014.
- [2]. G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, "State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation", *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
- [3]. D. Zheng and F. Da, "Self-correction phase unwrapping method based on Gray-code light", *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 8, pp. 1130–1139, 2012.
- [4]. Nguyen Thi Kim Cuc; Nguyen Van Vinh; Nguyen Thi Phuong Mai., "Construction of 3D Shape Measurement Equipment Using Gray Code Pattern", *Proc. AUN/SEED-Net Reg. Conf. Mech. Manuf. Eng.*, pp. 255–261, 2014.
- [5]. Nguyen Thi Kim Cuc; Nguyen Van Vinh; Nguyen Thanh Hung; Pham Xuan Khai., "Optimal parameters selection for 3D-mechanical surface measuring equipment based on the structured light Gray code", *J. Sci. Technol. Tech. Univ.*, no. 122/2017, pp. 22–27, 2017.

- [6]. H. Lin, J. Gao, Q. Mei, Y. He, J. Liu, and X. Wang, "Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement", *Opt. Express*, vol. 24, no. 7, p. 7703, 2016.
- [7]. P. S. H. Song, Zhang, "Novel method for structured light system calibration", *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 8, p. 083601, 2006.
- [8]. Nguyen Thi Kim. Cuc, Nguyen Van. Vinh, Nguyen Thanh. Hung, Nguyen Viet Kien "Improving the accuracy of the calibration method for structured light system", *J. Sci. Technol. Tech. Univ.*

ABSTRACT

EFFECTS OF AMBIENT LIGHT TO THE CALIBRATION ACCURACY OF 3D MEASUREMENT SYSTEM BASED ON PHASE SHIFT COMBINED WITH GRAY CODE PATTERNS PROJECTION

Calibration is an important process for a 3D structured light measurement system. In order to obtain an accurate measurement result, the system must be calibrated well. The calibration process depends on many factors: system parameters, ambient light... In this paper, a study on the effect of ambient light on the accuracy of system calibration is presented. The experimental system is calibrated at 13 illuminance levels of 0 to 360 lux on the calibration target. Experimental results have determined the relationship of ambient light and calibration results. Experimental results show that the ambient light in the range of 100 to 200 lux, the system calibration error is the smallest.

Keywords: System calibration; 3D structured light measurement; Phase shifting and Gray code.

Nhận bài ngày 21 tháng 5 năm 2018

Hoàn thiện ngày 15 tháng 6 năm 2018

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 8 năm 2018

Địa chỉ: ¹ Viện Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội;

² Khoa Cơ khí, Đại học Giao thông vận tải.

*Email: cucnkmx@gmail.com.