

Xác định điểm hội tụ của chùm laser với độ chính xác cao bằng xử lý ảnh tạo bởi ma trận vi thấu kính

Nguyễn Đức Dương^{1,2}, Thái Vũ Yên Nhi², Tào Đăng Khoa², Nguyễn Thị Phương Anh², Nguyễn Thị Kim Cúc², Cao Xuân Bình^{2*}

¹Viện Khoa học và Công nghệ, Bộ Công an, 30 Trần Bình Trọng, phường Nguyễn Du, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, phường Bách Khoa, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 7/8/2023; ngày chuyển phản biện 10/8/2023; ngày nhận phản biện 4/9/2023; ngày chấp nhận đăng 6/9/2023

Tóm tắt:

Gia công vật liệu không tiếp xúc bằng laser đã được ứng dụng nhiều trong thực tế. Đây là kỹ thuật hội tụ năng lượng ánh sáng công suất cao vào một diện tích nhỏ trên bề mặt chi tiết hay còn được gọi là phương pháp gia công cắt laser, hàn laser hoặc quét bề mặt. Một trong những mục tiêu chính của việc xác định điểm hội tụ đó là hệ thống có thể phát hiện nhanh và chính xác điểm hội tụ trên bề mặt chi tiết gia công. Để nâng cao độ chính xác và hiệu quả của việc phát hiện điểm hội tụ trong gia công laser, nghiên cứu này mô phỏng hệ phát hiện điểm hội tụ chùm tia laser bằng cách sử dụng ma trận vi thấu kính. Nghiên cứu sử dụng quang hình học để khảo sát ảnh hưởng của ma trận vi thấu kính tới vị trí điểm hội tụ, sau đó dùng phương pháp xử lý ảnh kiểm tra lại bằng mô phỏng trong OpticStudio. Phát hiện của chúng tôi cho thấy, độ chính xác vị trí điểm hội tụ của chùm tia laser dựa trên ma trận vi thấu kính khá cao, với sai số 2,9% so với tính toán lý thuyết. Đồng thời, mô hình mô phỏng là một tham khảo có giá trị để tinh chỉnh các thông số của hệ quang học trong các ứng dụng cần đo chính xác vị trí tiêu cự.

Từ khóa: điểm hội tụ laser, ma trận vi thấu kính, tìm điểm hội tụ.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.3, 2.11

High-precision detection of laser focal position based on image processing forming by microlens array

Duc Duong Nguyen^{1,2}, Vu Yen Nhi Thai², Dang Khoa Tao², Thi Phuong Anh Nguyen², Thi Kim Cuc Nguyen², Xuan Binh Cao^{2*}

¹Institute of Science and Technology, Ministry of Public Security, 30 Tran Binh Trong Street, Nguyen Du Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

²School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, 1 Dai Co Viet Street, Bach Khoa Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

Received 7 August 2023; revised 4 September 2023; accepted 6 September 2023

Abstract:

Many practical uses have been proven by purposely controlling light propagation to achieve adequate non-contact effects on materials. Delivering high-power light into a small region on the materials' surfaces, known as light focusing, allows us to perform several processing methods, such as laser cutting, welding, or scanning. One of the major goals in laser focusing includes the ability of the system to attain fast and precise focusing on the target surface. To enhance the precision and efficiency of focal point detection in laser processing, a simulation study of laser beam focusing with the use of a microlens array is presented. The effects of the microlens array on laser beam focusing are examined by applying geometrical optics to calculations and then verified by image processing simulated data in OpticStudio. Our findings show that microlens array-based laser beam focusing increases laser system performance significantly with a simulated result of up to 2.9% different from the calculations, and that simulation modelling can be a valuable tool for refining optical models in laser focusing.

Keywords: focal point detection, laser focus, microlens array.

Classification numbers: 1.3, 2.3, 2.11

*Tác giả liên hệ: Email: binh.caoxuan@hust.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Ngành kỹ thuật quang - cơ hiện nay đang dành sự quan tâm lớn cho việc phát triển các phương pháp tìm điểm hội tụ tự động trong gia công vật liệu bằng laser. Xác định được vị trí hội tụ với sai số nhỏ là yếu tố mấu chốt để đạt đến độ chính xác cao trong các quá trình gia công. Ma trận vi thấu kính là một quang cụ đa năng có nhiều ứng dụng, như: dùng trong tạo hình chùm tia laser, thông tin viễn thông, tích hợp trong các cảm biến và đo đạc mặt sóng, ví dụ như trong quá trình đo Shack-Hartmann [1]; dùng trong cải thiện chất lượng hình ảnh nhờ khả năng khử quang sai ánh sáng đơn sắc và tăng thị giới của hệ quang học. Trong tạo ảnh 3D, ma trận vi thấu kính tăng hiệu suất ánh sáng phát ra từ các thiết bị như các tấm nền diode phát sáng hữu cơ (OLED) hay tấm pin mặt trời [2]. Công nghệ này cũng được chú ý tới bởi tiềm năng trong đo đạc bán kính của các mặt phi cầu [3] và hệ quét [4]. Tuy nhiên, hiện nay lại chưa có công trình nghiên cứu nào về các hệ tự động xác định điểm hội tụ có sử dụng các tính chất đặc biệt của quang cụ này.

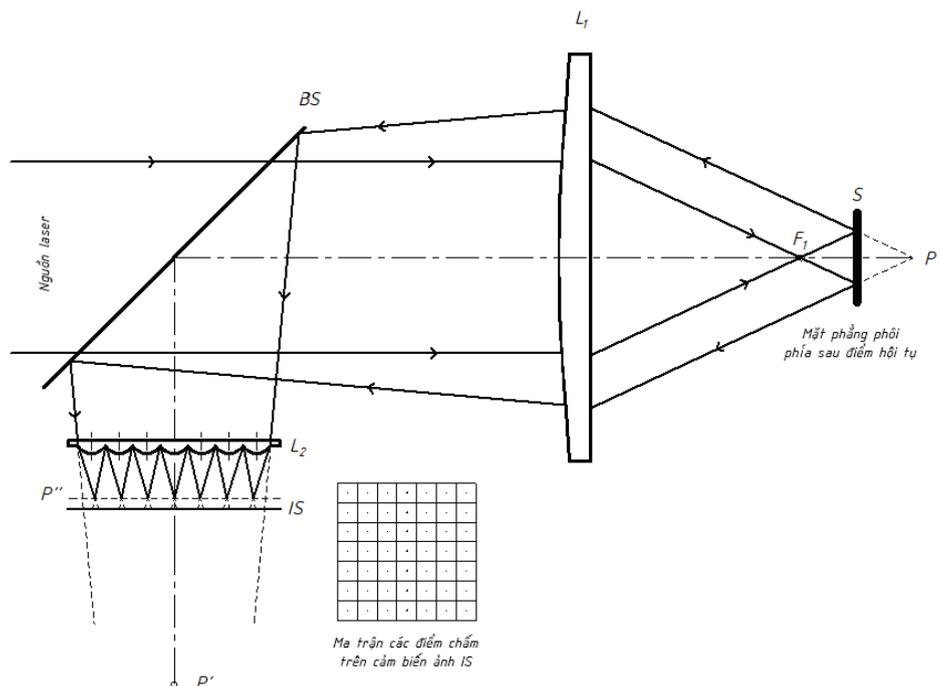
Trong 2 thập kỷ qua, nhiều phương pháp tìm điểm hội tụ tự động đã và đang được phát triển nhưng thường gặp phải các vấn đề liên quan đến độ chính xác và hiệu suất làm việc. Trong gia công có sử dụng laser, điểm hội tụ là vị trí trên bề mặt phôi mà tia laser có thể đạt đường kính nhỏ nhất với năng lượng cực đại. Nó đảm bảo cho độ chính xác cao nhất khi gia công. Khi xét một hệ gia công laser bất kỳ, một phương pháp tìm điểm hội tụ sẽ được đánh giá thông qua hai tiêu chí: độ chính xác và tốc độ nhận diện điểm hội tụ. Nhiều giải pháp được đưa ra đã tiếp cận việc tự động hội tụ bằng cách lợi dụng các tín hiệu của quá trình gia công, ví dụ như tín hiệu quang học [5-10], tín hiệu âm học [11, 12]. Các phương pháp này đã được ứng dụng trong một số phương pháp gia công và đo lường của các lĩnh vực có sử dụng chùm tia laser [13-18], đặc biệt là các lĩnh vực quan trọng như chế tạo mạch in, khoan, cắt và kiểm tra vi cấu trúc cấp nano. Việc chú ý tới những hệ quang tìm điểm hội tụ tự động đã dẫn tới phát triển nhiều hệ thống tìm điểm hội tụ tiên tiến trong nghiên cứu chuyên sâu. Những hệ này, bằng nhiều cách khác nhau, tận dụng nhiều dạng tín hiệu, đã góp phần giúp các quá trình gia công laser chính xác và hiệu quả hơn. Tuy nhiên, các phương pháp đã đề cập ở trên đều có hạn chế, đó là vấn đề về cân bằng giữa độ chính xác và hiệu suất. Với các hệ có cấu tạo đơn giản, chúng cho ra kết quả

trong thời gian ngắn nhưng lại thiếu tính chính xác [13-15]. Những hệ cho kết quả chính xác hơn lại thường yêu cầu thiết lập phức tạp hoặc tốn nhiều thời gian hơn để cho ra kết quả [16, 18]. Hệ thống được xây dựng trong bài báo này chỉ sử dụng một ma trận vi thấu kính duy nhất để xác định điểm hội tụ. Vì thế, quang sai của hệ được giảm xuống mức rất nhỏ và có thể chủ động loại bỏ thông qua tính toán. Do kích thước nhỏ của từng mắt thấu kính, hệ cũng rất nhạy khi phát hiện sự thay đổi của bề mặt phôi gia công.

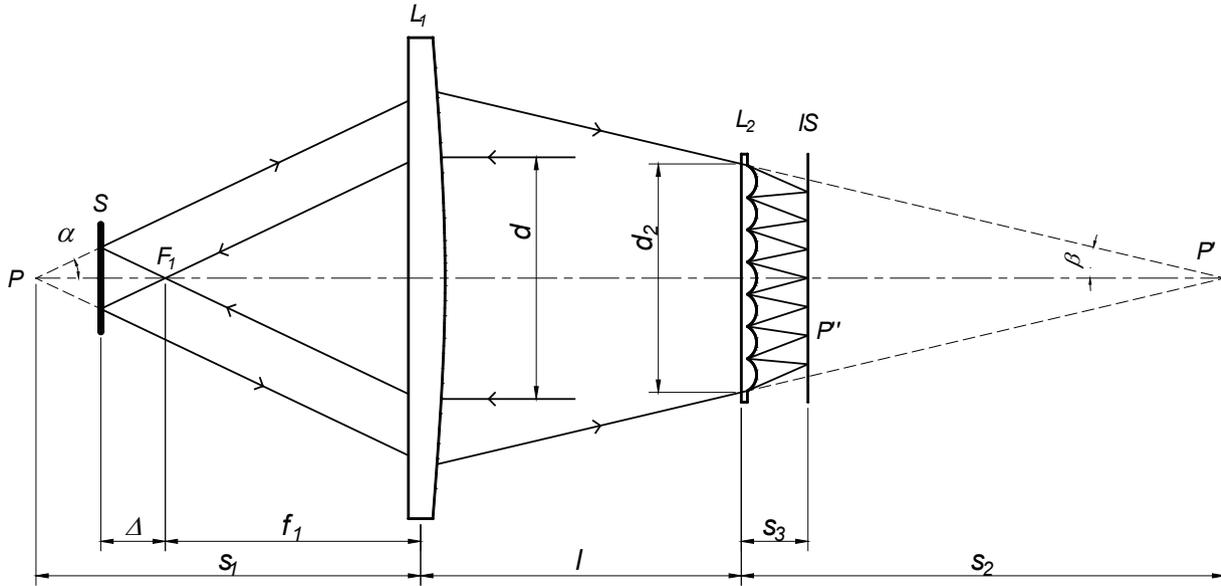
Nghiên cứu này đưa ra mô hình lý thuyết và tính toán cần thiết để tiến hành xây dựng hệ quang. Cùng với đó, nhóm nghiên cứu tiến hành thí nghiệm trên phần mềm OpticStudio để thu thập dữ liệu, so sánh và xác nhận mô hình lý thuyết. Bài báo cũng đưa ra nhận xét và bàn luận về kết quả thu được.

2. Phân tích lý thuyết

Phần này trình bày sơ đồ của hệ quang được thiết kế cho việc phát hiện độ lệch điểm hội tụ so với bề mặt gia công - gọi là Δ . Chùm tia laser từ nguồn đi qua gương bán mạ (BS) tới thấu kính L_1 và hội tụ tại bề mặt phôi (S). Bề mặt phôi được xem như gương phẳng phản xạ lại, chùm tia phản xạ qua L_1 lần thứ 2, qua gương bán mạ tới ma trận vi thấu kính L_2 tạo thành ảnh trên cảm biến hình ảnh (IS) (hình 1). Hệ quang điều chỉnh ban đầu sao cho chùm tia là song song khi đi tới L_2 , tạo thành một ma trận các điểm chấm trên IS (tức là IS được đặt tại tiêu diện của L_2). Dựa vào sự thay đổi vị trí của các điểm chấm trên IS để có thể tính ra độ lệch của S so với điểm hội tụ F_1 .



Hình 1. Sơ đồ của hệ quang được đề xuất và cấu hình của ma trận vi thấu kính được sử dụng.



Hình 2. Nguyên tắc hoạt động của hệ quang.

Để tiện cho các tính toán, hình 2 mô tả nguyên lý hoạt động của hệ quang và các ký hiệu toán học. Nguồn laser chiếu từ phải sang trái với đường kính là d .

Do bề mặt S được coi là một gương phẳng phản xạ hoàn toàn ánh sáng chiếu tới nên $PS = F_1S$. Khoảng cách từ điểm P tới thấu kính L_1 là s_1 được tính bằng công thức sau:

$$s_1 = 2\Delta - f_1 \quad (1)$$

Theo quy ước dấu, tiêu cự của thấu kính hội tụ L_1 dương ($f_1 > 0$) trong khi khoảng cách s_1 tính về phía bên trái nên $s_1 < 0$, góc α phía trên trục quang ngược kim đồng hồ nên $\alpha > 0$.

$$\tan \alpha = \frac{d}{2f_1} \quad (2)$$

Ở đây, tiêu cự thấu kính L_1 là f_1 ; Δ là khoảng lệch khỏi điểm hội tụ so với S (với $\Delta = 0$ là hội tụ chính xác trên bề mặt, $\Delta < 0$ là hội tụ phía trước bề mặt phôi, $\Delta > 0$ là hội tụ phía sau bề mặt phôi).

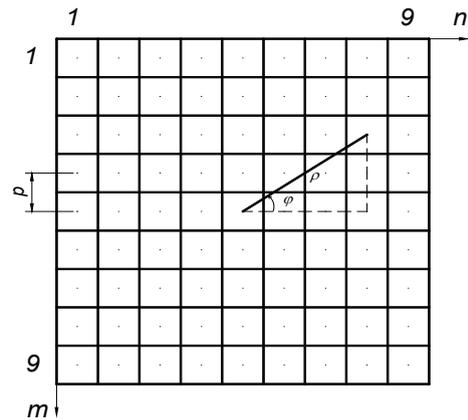
Áp dụng công thức Gauss [19] cho thấu kính L_1 :

$$\frac{1}{l + s_2} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{f_1} \Leftrightarrow s_2 = \frac{s_1 f_1}{s_1 + f_1} - l \quad (3)$$

với s_2 là khoảng cách từ P' tới thấu kính L_2 ; l là tổng khoảng cách từ L_1 tới L_2 . Ở đây, ta coi như là thấu kính mỏng để tính toán bởi kích thước chùm laser nhỏ hoạt động ở vùng gần trục quang.

Giá trị s_2 được tính bằng cách thế s_1 từ phương trình (1):

$$s_2 = \frac{f_1(2\Delta - f_1)}{2\Delta} - l \quad (4)$$



Hình 3. Ma trận vi thấu kính kích thước $m \times n$.

Vi thấu kính L_2 thực tế là một cụm các vi thấu kính, vị trí của từng thấu kính có thể được ký hiệu dựa theo một ma trận cỡ $m \times n$ (hình 3). Vị trí quang tâm ρ_{mn} của mỗi vi thấu kính được xác định bằng cách sử dụng hệ tọa độ cực:

$$\rho_{mn} = p \times \sqrt{\left(\frac{M+1}{2} - m\right)^2 + \left(\frac{N+1}{2} - n\right)^2} \quad (5)$$

$$\tan \varphi = \frac{\left|\frac{M+1}{2} - m\right|}{\left|\frac{N+1}{2} - n\right|} \quad (6)$$

với ρ_{mn} là vị trí quang tâm của vi thấu kính tại hàng m ; cột n , p là bước vi thấu kính; φ là tọa độ góc; M và N lần lượt là số hàng và số cột của ma trận vi thấu kính (ví dụ, ở hình 3, $M=N=9$).

Đường kính chùm laser d_2 đảm bảo kích thước nhỏ hơn thấu kính L_2 được tính theo quan hệ:

$$d_2 = -2 \cdot s_2 \cdot \tan \beta \quad (7)$$

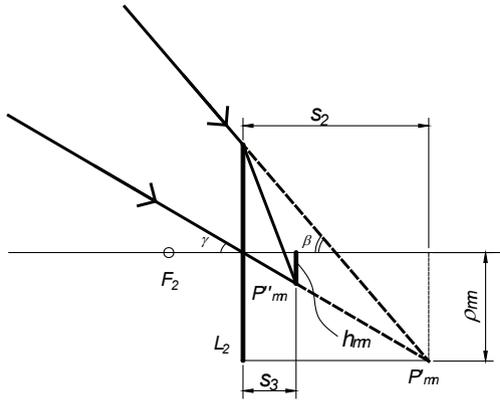
Mặt khác, quan hệ tỷ số:

$$\frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = \frac{s_1}{l + s_2} = \frac{2\Delta - f_1}{l + \left[\frac{f_1(2\Delta - f_1)}{2\Delta} - l \right]} = \frac{2\Delta}{f_1} \quad (8)$$

Thay (2) vào (8) ta tính được:

$$\tan \beta = \frac{2\Delta}{f_1} \times \frac{d}{2f_1} = \frac{d\Delta}{f_1^2} \quad (9)$$

Biết s_2 , $\tan \beta$ và khoảng lệch khỏi điểm hội tụ Δ ta tính được d_2 , từ đó có kích thước hợp lý của vi thấu kính L_2 , đảm bảo vết laser nằm hoàn toàn trên thấu kính L_2 .



Hình 4. Sơ đồ tạo ảnh qua vi thấu kính.

Chùm tia chuẩn trục tới thấu kính L_2 với góc lệch $\beta=0$ bị chia tách thành $M \times N$ điểm hội tụ trên IS, với khoảng cách giữa hai điểm hội tụ liên tiếp $P''_{\beta=0} = p$. Xét một chùm tia bất kỳ với $\beta \neq 0$ tới L_2 , vị trí hội tụ trên IS có khoảng dịch h_{mn} so với điểm $P''_{\beta=0} = p$ (hình 4):

$$h_{mn} = \frac{s_3}{s_2} \rho_{mn} = \frac{f_2}{s_2 + f_2} \rho_{mn} \quad (10)$$

Tại $\rho_{mn}=0$, ở quang tâm ban đầu của vi thấu kính, ảnh được tạo luôn cố định, trong khi với các vi thấu kính càng xa vị trí trung tâm, độ dịch chuyển của điểm hội tụ càng lớn. Khi f_2 tăng, h_{mn} cũng tăng, dẫn đến tăng độ phân giải trong quá trình xác định Δ .

Áp dụng các phép tính toán tương tự L_1 cho L_2 :

$$s_3 = \frac{s_2 \cdot f_2}{s_2 + f_2} \quad (11)$$

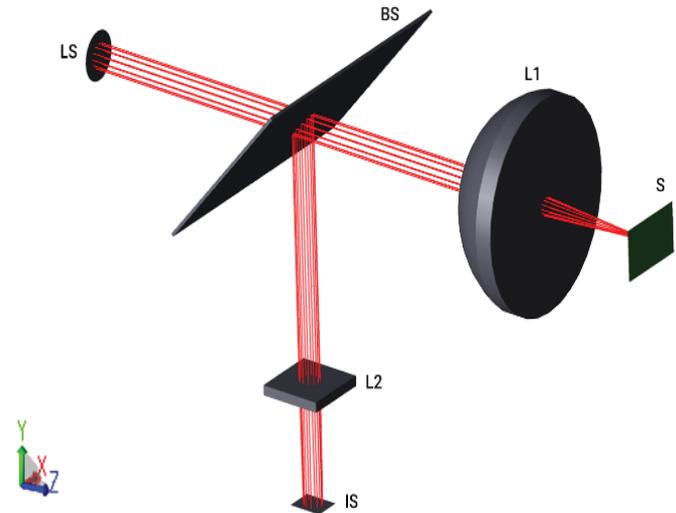
Thế phương trình (4) và (11) vào phương trình (10), thu được Δ :

$$\Delta = \frac{f_1^2}{2 \times \left(f_1 - f_2 - l - \frac{\rho_{mn}}{h_{mn}} f_2 \right)} \quad (12)$$

Bằng cách tính khoảng cách h_{mn} trên vi thấu kính thứ $(m \times n)$ tại IS, ta xác định được độ dịch Δ (sử dụng phương trình (12)).

3. Kết quả và bàn luận

Để kiểm tra mô hình lý thuyết, ta tiến hành mô phỏng trên phần mềm OpticStudio (hình 5). Nguồn laser được sử dụng có bước sóng 635 nm, chùm tia có độ phân kỳ 0,6 mrad. Ma trận vi thấu kính L_2 có dạng hình vuông, kích cỡ 10×10 mm, tiêu cự $f_2=14,225$ mm, khoảng cách quang tâm giữa các vi thấu kính 300 μ m. Bảng 1 liệt kê chi tiết thông số đầu vào của các quang cụ trong hệ quang.

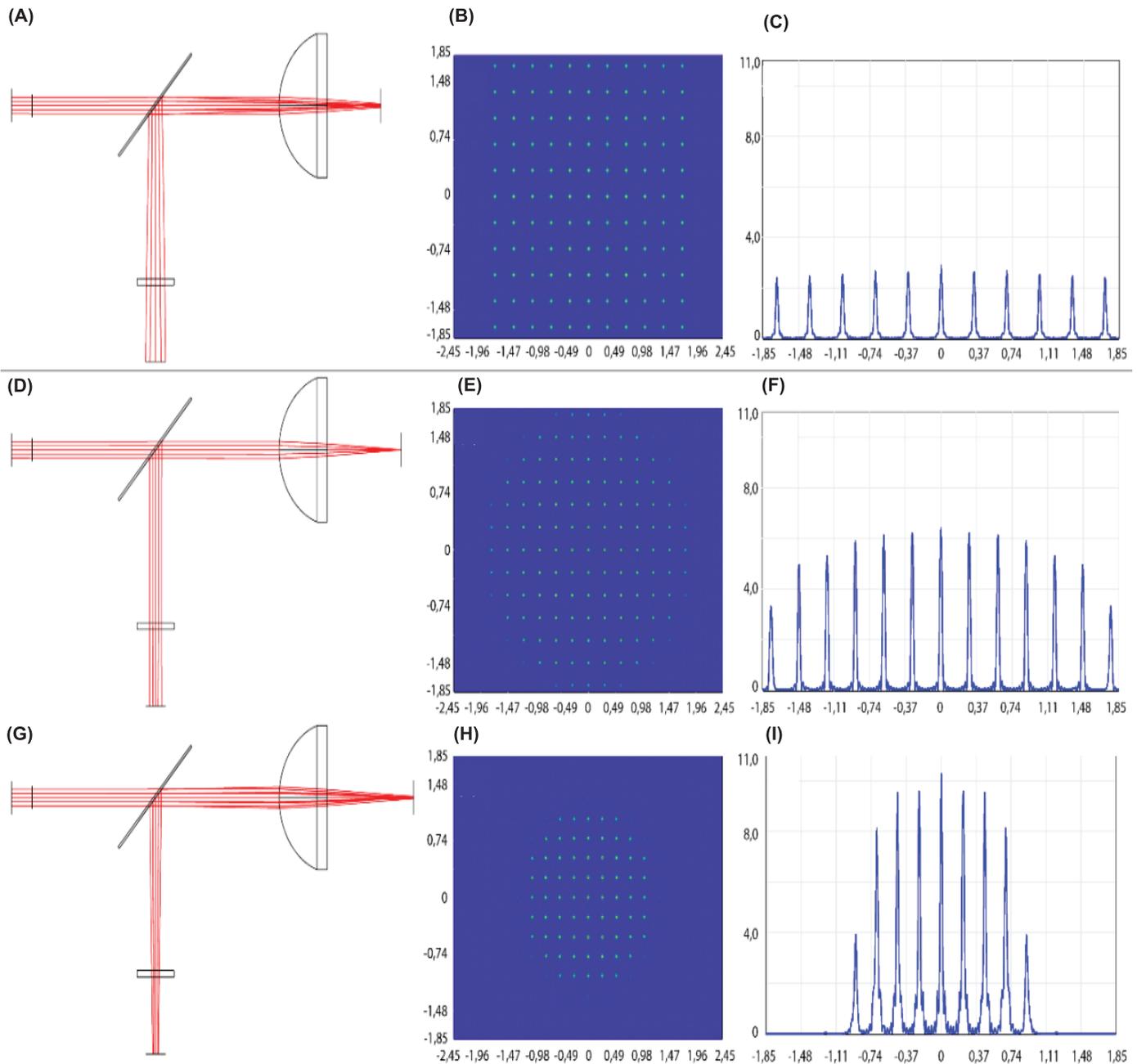


Hình 5. Sơ đồ mô tả hệ quang mô phỏng tìm điểm hội tụ trên phần mềm OpticStudio. LS: nguồn laser; BS: gương bán mạ; L_1 : vật kính; L_2 : ma trận vi thấu kính; IS: cảm biến hình ảnh; S: bề mặt vật mẫu.

Bảng 1. Các thông số được sử dụng trong quá trình mô phỏng.

Nguồn laser	$\lambda=635$ nm $d=4,0$ mm Độ phân kỳ của chùm tia: 0,6 mrad
Vật kính (L_1)	$R_{\text{trái}}=13,1$ mm $R_{\text{phải}}$ phẳng Độ dày=11,7 mm Vật liệu: N-BK7 $f_1=25,436$ mm $\Phi=25$ mm
Ma trận vi thấu kính (L_2)	Vật liệu: Thạch anh Tiêu cự f_2 : 14,225 mm Khoảng cách (p): 300 μ m Kích cỡ: 10×10 mm, dạng vuông
Khoảng cách giữa các thấu kính	$l_1=30$ mm (L_1 tới BS) $l_2=30$ mm (L_2 tới BS)

Nguồn: Các thông số do nhóm thực hiện mô phỏng đề xuất, phù hợp với các lĩnh vực sẵn có của lab.



Hình 6. Mô phỏng vị trí các điểm chấm trên cảm biến tại các vị trí khác của thấu. (A, B, C) Hội tụ phía trước thấu; (D, E, F) Hội tụ trên bề mặt thấu; (G, H, I) Hội tụ phía sau thấu.

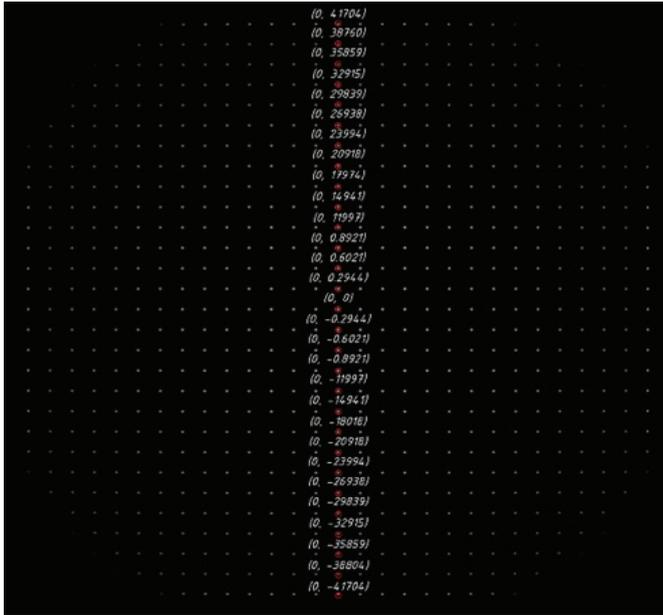
Xét vị trí của mặt phẳng thấu nằm tại tiêu diện của thấu L_1 , chùm tia tới đi qua ma trận vi thấu kính L_2 , tạo thành các điểm chấm cách nhau 0,3 mm (hình 6D, 6E và 6F). Dịch mặt phẳng thấu về phía L_1 ($\Delta > 0$), khiến chùm tia đi tới L_2 phân kỳ, tạo thành chùm tia có đường kính lớn hơn d , khoảng cách giữa các điểm chấm là $0,3 + h_{mn}$ (hình 6A, 6B và 6C). Tương tự, với $\Delta < 0$, khoảng cách giữa các chấm là $0,3 - h_{mn}$ (hình 6G, 6H và 6I).

Với các thông số đầu vào $f_1 = 25,436$ mm, $f_2 = 14,225$ mm, $l = l_1 + l_2 = 60,000$ mm, áp dụng phương trình (12) cho giá trị Δ là:

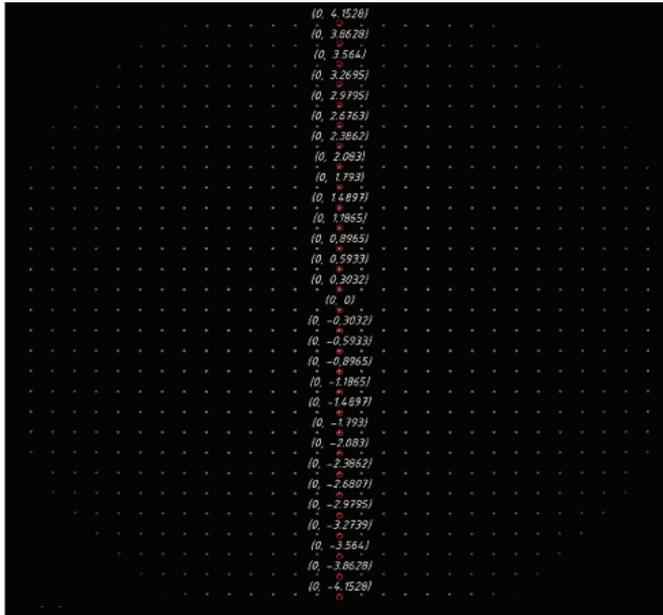
$$\Delta = \frac{646,99}{-97,578 - 28,45 \times \Gamma} \quad (13)$$

Với $\Gamma = \frac{\rho_{mn}}{h_{mn}}$ là hệ số phóng đại, ρ_{mn} được tính với $M = N = 29$.

(A)



(B)



Hình 7. Vị trí các điểm chấm với $\Delta=0$ (A) và $\Delta=-0,1$ (B).

Đầu tiên, điều chỉnh phôi trùng với mặt phẳng tiêu diện của L_1 (vị trí 1) và chụp ảnh các điểm chấm; sau đó lại dịch phôi ra xa $-0,1$ mm (vị trí 2) và cũng chụp ảnh các điểm chấm. Như vậy, sau hai lần dịch chuyển phôi có hai hình ảnh phân bố cường độ trên cảm biến tại vị trí 1 và 2 (hình 7). Không mất tính tổng quát và để đơn giản hóa tính toán, ta có thể khảo sát sự thay đổi các điểm chấm tại cột trung tâm ở hai vị trí 1 và 2. Sự thay đổi này là h chính là hiệu các tọa độ tại hai vị trí và được ghi lại trên bảng 2.

Bảng 2. Tọa độ và khoảng thay đổi.

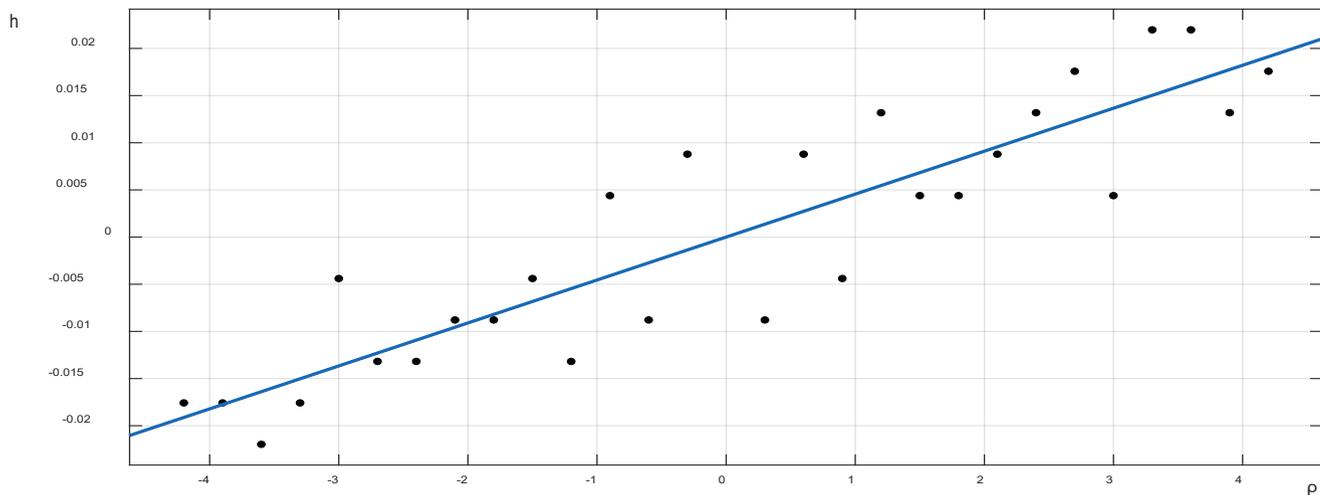
Hàng số	Tọa độ điểm chấm tại cột trung tâm ở vị trí 1	Tọa độ các điểm chấm tại cột trung tâm ở vị trí 2	h
1	(0; 4,1704)	(0; 4,1528)	0,0176
2	(0; 3,8760)	(0; 3,8628)	0,0132
3	(0; 3,5859)	(0; 3,5640)	0,0220
4	(0; 3,2915)	(0; 3,2695)	0,0220
5	(0; 2,9839)	(0; 2,9795)	0,0044
6	(0; 2,6938)	(0; 2,6763)	0,0176
7	(0; 2,3994)	(0; 2,3862)	0,0132
8	(0; 2,0918)	(0; 2,0830)	0,0088
9	(0; 1,7974)	(0; 1,7930)	0,0044
10	(0; 1,4941)	(0; 1,4897)	0,0044
11	(0; 1,1997)	(0; 1,1865)	0,0132
12	(0; 0,8921)	(0; 0,8965)	-0,0044
13	(0; 0,6021)	(0; 0,5933)	0,0088
14	(0; 0,2944)	(0; 0,3032)	-0,0088
15	(0; 0)	(0; 0)	0
16	(0; -0,2944)	(0; -0,3032)	0,0088
17	(0; -0,6021)	(0; -0,5933)	-0,0088
18	(0; -0,8921)	(0; -0,8965)	0,0044
19	(0; -1,1997)	(0; -1,1865)	-0,0132
20	(0; -1,4941)	(0; -1,4897)	-0,0044
21	(0; -1,8018)	(0; -1,7930)	-0,0088
22	(0; -2,0918)	(0; -2,0830)	-0,0088
23	(0; -2,3994)	(0; -2,3862)	-0,0132
24	(0; -2,6938)	(0; -2,6807)	-0,0132
25	(0; -2,9839)	(0; -2,9795)	-0,0044
26	(0; -3,2915)	(0; -3,2739)	-0,0176
27	(0; -3,5859)	(0; -3,5640)	-0,0220
28	(0; -3,8804)	(0; -3,8628)	-0,0176
29	(0; -4,1704)	(0; -4,1528)	-0,0176

Đơn vị: mm.

Dựa theo quan hệ tuyến tính giữa h và ρ (hình 8), sử dụng phép hồi quy tuyến tính để tìm hàm quan hệ giữa $h=f(\rho)$.

$$h=0,004553\rho \quad (14)$$

Để xác nhận lại kết quả này, chọn một giá trị ρ bất kỳ, ở đây lấy $\rho=2,6832$ (vi thấu kính tại vị trí (11,7)), tính được kết quả $\Delta=-0,1029$, sai khác 2,9% so với mô phỏng.



Hình 8. Biểu đồ thể hiện quan hệ tuyến tính giữa h và ρ .

4. Kết luận

Hệ quang được trình bày trong bài báo và kết quả mô phỏng trên phần mềm OpticStudio cho thấy khả năng định vị nhanh điểm hội tụ trên bề mặt phôi. Kết quả thu được chứng minh đây là một phương pháp đáng tin cậy với khả năng đo chính xác, có thể đo được khoảng cách tới bề mặt phôi theo cả hai chiều. Thông qua mô phỏng, ta có thể đánh giá được mô hình trước khi đưa vào hệ quang thực trong phòng thí nghiệm, với sai khác của hệ mô phỏng chỉ 2,9% so với tính toán lý thuyết. Hệ thống này đã chứng minh được độ nhạy phát hiện khi điểm hội tụ của tia laser trên bề mặt phôi thay đổi. Đồng thời, qua mô phỏng có thể đánh giá và kiểm nghiệm mô hình lý thuyết trước khi đưa vào sử dụng thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), mã số 103.03-2020.48. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D. Daly (2000), *Microlens Arrays*, 1st Edition, CRC Press, New York, 248pp.
 [2] S. Cai, Y. Sun, H. Chu, et al. (2021), "Microlenses arrays: Fabrication, materials, and applications", *Microsc. Res. Tech.*, **84**(11), pp.2784-2806, DOI: 10.1002/jemt.23818.
 [3] J. Chen, M. Chen, H. Wu, et al. (2022), "Distortion spot correction and center location base on deep neural network and MBAS in measuring large curvature aspheric optical element", *Optics Express*, **30**(17), pp.30466-30479, DOI: 10.1364/OE.462482.
 [4] Z. Ge, Z. Liu, Y. Huang, et al. (2023), "Analysis and design of a microlens array scanning system based on spherical aberration", *Applied Optics*, **62**(1), pp.227-234, DOI: 10.1364/AO.468180.
 [5] Y.J. Chang, C.Y. Wang, J.C. Hsu, et al. (2019), "Real-time laser-induced plasma monitoring in percussion pulsed laser material processing", *Measurement*, **135**, pp.905-912, DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.042.
 [6] C.C. Ho, J.J. He (2014), "On-line monitoring of laser-drilling process based on coaxial machine vision", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **15**, pp.671-678, DOI: 10.1007/S12541-014-0386-x.

[7] C.C. Ho, Y.J. Chang, J.C. Hsu, et al. (2016), "Optical emission monitoring for defocusing laser percussion drilling", *Measurement*, **80**, pp.251-258, DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.031.
 [8] D.D. Vallejo, D. Ashkenasi, H.J. Eichler (2013), "Monitoring of focus position during laser processing based on plasma emission", *Phys. Procedia*, **41**, pp.911-918, DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.166.
 [9] B.X. Cao, P.L. Hoang, S. Ahn, et al. (2018a), "Real-time laser focusing system for high-precision micromachining using diffractive beam sampler and advanced image sensor", *Opt. Lasers Eng.*, **107**, pp.13-20, DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.03.002.
 [10] S. Ahn, B.X. Cao, P.H. Le, et al. (2017), "Automatic real-time focus control system for laser processing using dynamic focusing optical system", *Optics Express*, **25**(23), pp.28427-28441, DOI: 10.1364/OE.25.028427.
 [11] A. Kacaras, M. Bächle, M. Schwabe, et al. (2019), "Acoustic emission-based characterization of focal position during ultra-short pulse laser ablation", *Procedia CIRP*, **81**, pp.270-275, DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.047.
 [12] Y. Cai, N.H. Cheung (2011), "Photoacoustic monitoring of the mass removed in pulsed laser ablation", *Microchemical Journal*, **97**(2), pp.109-112, DOI: 10.1016/j.microc.2010.08.001.
 [13] B.X. Cao, P.L. Hoang, S. Ahn, et al. (2017), "In-situ real-time focus detection during laser processing using double-hole masks and advanced image sensor software", *Sensors*, **17**(7), DOI: 10.3390/S17071540.
 [14] B.X. Cao, P.L. Hoang, S. Ahn, et al. (2018b), "Measurement of focal length based on laser-beam-spot tracking system using diffractive beam sampler", *Measurement*, **122**, pp.135-140, DOI: 10.1016/j.measurement.2018.03.011.
 [15] B.X. Cao, M. Bae, H. Sohn, et al. (2016), "Design and performance of a focus-detection system for use in laser micromachining", *Micromachines*, **7**(1), DOI: 10.3390/M17010002.
 [16] M. Chen, S. Takahashi, K. Takamasu (2016), "Multi-beam angle sensor for flatness measurement of mirror using circumferential scan technology", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **17**, pp.1093-1099, DOI: 10.1007/S12541-016-0133-6.
 [17] C.Y. Jiang, W.S. Lau, T.M. Yue, et al. (1993), "On the maximum depth and profile of cut in pulsed Nd: YAG laser machining", *CIRP Annals*, **42**(1), pp.223-226, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62430-5.
 [18] M. Chen, S. Takahashi, K. Takamasu (2015), "Development of high-precision micro-roundness measuring machine using a high-sensitivity and compact multi-beam angle sensor", *Precis. Eng.*, **42**, pp.276-282, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.05.009.
 [19] W.J. Smith (2000), *Modern Optical Engineering*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 617pp.