

אופטיקה – תדריך עבודה

מטרות הניסוי

בניסוי זה נתנסה באופטיקה גיאומטרית. נלמד כיצד מנותבות קרני אור במעברן דרך עדשות דקות, ומתוך הבנה זו:

1. נמצא אורך מוקד של עדשה מרכזת ונאמת את נוסחת ההגדלה הקווית.
2. נמצא אורך מוקד של עדשה מפזרת.

רשימת ציוד

1. בסיס אופטי עם שנתות סרגל.
2. סט עדשות מרכזות ומפזרות, מסומנות על ידי מדבקות צבעוניות, בעלות אורכי מוקד שונים. העדשות מחוברות לרוכבים המותאמים לנוע על הבסיס האופטי.
3. מסך לבן המחובר לרוכב.
4. מקור אור הלוגן מתכוון המחובר לספק כוח.
5. סט שקופיות.
6. מעמד שקופיות המחובר לרוכב.
7. מד מטר ונייר מילימטרי בעלי רזולוציה של 1 מ"מ.

הנחיות כלליות לביצוע המדידות בניסוי

1. לאורך כל שלבי הניסוי נשתמש בבסיס אופטי. לבסיס זה יש שנתות סרגל, ברזולוציה של 1 מ"מ, ועליו ניתן להניח רוכבים. אל הרוכבים מחוברים עדשות, מסך ושקופיות, וניתן להניע אותם ברציפות לאורך הבסיס האופטי. **היעזרו בהנחיות בנספח א' לגבי מיקום הרוכבים, על מנת לצמצם ולהעריך נכונה את השגיאות.**
2. אף על פי שהמידע הפיזיקלי בו נשתמש בניסוי יהיה המרחק בין רכיבי המערכת השונים (לפי נוסחא (1) ברקע התיאורטי), הגדלים המדודים יהיו מיקומי חלקי המערכת השונים, ומתוך הפרשי המיקומים לאורך הבסיס האופטי, נחשב בכל פעם את המרחק המתאים.

3. חשוב מאוד להקפיד לרשום את המיקומים, ולהימנע מרישום ישיר של המרחקים. אף על פי שרישום המרחקים עשוי להראות כקיצור דרך, הוא פתח לטעויות, הוא אינו מאפשר לשחזר מדידות מפוספסות, ועל כן יכול לעיקוב מיותר בזמן עיבוד הנתונים.
4. יש לשים לב כי כל המרחקים הרלוונטיים בניסוי (u, v, f) יכולים להיות גדלים שליליים. לכן, עליכם לוודא כי חישובי המרחקים ממדידות המיקומים מתבצעים בצורה הנכונה.
5. המיקומים אותם נמדוד, יהיו צריכים בסופו של דבר לשקף את מיקומי הרכיבים במערכת (עדשות, מסך ועצם). כאשר אנו באים למדוד את מיקומי הרכיבים על הבסיס האופטי, אין באפשרותנו למדוד ישירות את המיקום של רכיבים אלו, מכיוון שהם מחוברים אל הרכיבים באיזור מרכז הרכיבים, ואין אנו יודעים היכן מרכז זה נופל על הסרגל. על מנת להקל על תהליך המדידה, ניתן לקרוא את מיקום הרכיב מאחד הצדדים שלו. באופן זה, למיקום הרכיב נוספת שגיאה שיטתית. אם אנו מניחים שכל הרכיבים זהים, ולכן גם מיקומי הרכיבים על הרכיבים זהים, שגיאה זו תהיה זהה עבור כל המיקומים, ולכן תתבטל כאשר נחשב את הפרשי המיקומים על מנת לקבל את המרחקים הרצויים. יש רק לוודא שקריאת מיקום הרכיבים מתבצעת באותו האופן (כלומר מאותו הצד) לאורך כל המדידות.
6. יש להקדיש מחשבה להערכת השגיאות בניסוי. נדון בכך לאחר ביצוע החלק הראשון, כדי להכיר קודם את המערכת באופן כללי, ואת מושגי היסוד.

חלק א' – מדידת אורך המוקד של עדשה מרכזת ואימות נוסחת ההגדלה הקווית

הכנה לניסוי:

שאלות הכנה

1. כתבו את הנוסחה המפורשת לאורך המוקד f ולשגיאתו Δf , כאשר נתונים $u, \Delta u, v, \Delta v$.
2. ניסוי למדידת אורך מוקד של עדשה מבוצע ע"י מדידת N זוגות ערכים של u ו- v . כשנציג את התוצאות הנמדדות על גרף באופן ליניארי:

- א. מה תייצג קואורדינטת ציר Y ומה תייצג קואורדינטת ציר X ?
- ב. איזו אינפורמציה ניתן לקבל מידיעת ערך הנקודה בה חותך הישר את ציר Y ?

ביצוע המדידות:

• מדידה ישירה של מוקד העדשה:

1. בחרו עדשה מרכזת מתוך סט העדשות שלפניכם (כיצד תדעו שבחרתם בעדשה מרכזת? מומלץ גם למצוא בשלב זה עדשה מפזרת התשמש אתכם לחלק השני של הניסוי). עם עדשה מרכזת זו תעבדו במהלך כל הניסוי. יש לבחור עדשה עם אורך מוקד בין 7 ס"מ ל-20 ס"מ (זאת על מנת להקל על המדידות בחלקים הבאים של הניסוי).
2. ראשית, כיוון שאיננו יודעים מהו אורך המוקד של העדשה, נרצה לקבל הערכה ראשונית בעזרת מדידה ישירה של אורך המוקד. לשם כך, מקמו על הבסיס האופטי מסך שפונה לעבר החלון, ולפניו את העדשה המרכזת, כך שהיא תעמוד בין המסך לחלון. ה"עצם" שאת דמותו תרצו לראות על המסך הוא בניין שרייבר. כדי לקבל הערכה ראשונית לגודל המוקד, נניח לשם הפשטות כי בניין שרייבר ממוקם באינסוף. בעזרת המידע הנ"ל עליכם למדוד בקירוב את אורך המוקד של העדשה אותה בחרתם. יש להשתמש ב"נוסחת העדשות". (איזה גודל במשוואה נותן בקירוב את אורך המוקד?)
3. **שימו לב כי קיים תחום מרחקים עבורו הדמות תראה מפוקסת.** כיצד תבחרו בדיוק הטוב ביותר את הפוקוס האמיתי? מהי השגיאה במקרה הזה? **היעזרו בנספח א' לקביעת השגיאה.**
4. לאחר מכן, יינתן לכם מרחקו האמיתי לעצם עליו השקפתם. מרחק זה מדוד עבור נקודות ספציפיות במעבדה, ולא עבור העמדה שלכם. על-כן, עליכם למדוד את המרחק (האנכי) מהנקודה הקרובה לעמדתכם בעזרת מד המטר, ועד לעדשה שלכם. חישבו, האם מדידה זו "מדויקת"? איך ניתן להעריך את השגיאה במדידה זו? ואיך יש לשקלל את השגיאות על מנת לקבל את השגיאה הכוללת של u ? חשבו את אורך המוקד של העדשה לפי הנתון החדש, והשוו איכותית בין הערכים אותם קיבלתם בין שתי השיטות. האם ההנחה שהבניין נמצא באינסוף היא הנחה טובה?

• מדידה עקיפה של מוקד העדשה ואימות נוסחאת ההגדלה הקווית:

1. כעת נרצה לבצע מדידה עקיפה של אורך המוקד. נמצא את אורך המוקד של העדשה המרכזת באמצעות ביצוע התאמות גרפיות לנוסחת העדשות – התאמה ליניארית

והתאמה לא ליניארית. נשתמש באותם הרכיבים כבחלק הקודם, המסך והעדשה שבחרתם, ובנוסף, גם במקור אור וסט שקופיות.

2. הניחו את השקופית לפני מקור האור בצמוד אליו (שימו לב איזה צד צריך לפנות אל מקור האור). שקופית זו תהיה ה"עצם". האם כל שקופית תהיה נוחה לביצוע המדידות? אם הציור על גבי השקופית בעל פרטים רבים, מומלץ להתמקד בנקודה אחת על המסך ולראות האם היא בפוקוס בכל מדידה.

3. לאחר מכן מקמו את העדשה על הבסיס, ואת המסך על המשכו.

4. לכל אורך המדידות אין צורך לשנות את מיקום השקופית, ועל כן ניתן לקבע את רוכב השקופית אל הבסיס באמצעות הבורג הקדמי של הרוכב.

5. תחילה מזיזים את העדשה למיקום כלשהו בין השקופית למסך ורושמים אותו. לאחר מכן מתחילים להזיז את המסך כדי למצוא את המיקום שבו הדמות מפוקסת. **שימו לב!** ישנו טווח מרחקים שבו הדמות נראית בפוקוס ולכן נמצא את קצוות הטווח על ידי הזזת המסך מהעדשה ואל העדשה. היכן נמצא "שיא הפוקוס"? איך נקבע את מרחק הדמות מהעדשה אם יש לנו טווח ולא נקודה אחת שבו הדמות מפוקסת? איך מתפלגת השגיאה של "שיא הפוקוס"? ואיך נחשב את השגיאה הכוללת של מרחק הדמות מהעדשה כתוצאה מקביעת קצוות התחום והתפלגות הפוקוס בין שתי נקודות אלו?

6. כמו כן, **בכל מדידה יש לאמת את הקשר בין ההגדלה הקוויות M לבין u ו- v כפי שמוסבר ברקע התיאורטי (נוסחא (2) ברקע התיאורטי)**. לשם כך, תחילה יש למדוד את גובה העצם בתחילת הניסוי (כלומר, לבחור שתי נקודות מסויימות בשקופית ולמדוד את המרחק בניהן עם סרגל). לאחר מכן, בכל מדידת מיקומים יש למדוד את גובה הדמות (כלומר, למדוד את המרחק בין אותן שתי הנקודות על המסך). את הגובה יש למדוד בנקודת "שיא הפוקוס" שקבעתם. (הניחו כי שגיאת גודל העצם ושגיאת גודל הדמות הינה כשגיאת מכשיר המדידה שבידכם)

7. בצעו לפחות 10 סטים של מדידות, כך שכל סט הוא מדידה של מיקום העדשה, מיקומי המסך בקצוות טווח הפוקוס וגובה הדמות). האם כדאי לבצע את המדידות לאורך כל הבסיס האופטי? האם טווח הפוקוס הנמדד הוא באותו סדר גודל לאורך כל הבסיס? אם לא, עבור אילו מרחקי u כדאי לבצע יותר מדידות? (חישבו: איך נראה הקשר של v כפונקציה של u)

8. במהלך העבודה ועיבוד הנתונים שימו לב לדברים הבאים:

- א. למניעת עיוותים העלולים לפגום באיכות המדידה שלכם יש להקפיד למקם את מקור האור **על אותו הציר ובאותו הגובה** כמו כל שאר רכיבי המערכת (השקופית, העדשה והמסך) כך שקרן האור תעבור דרך השקופית ודרך העדשה בצורה המיטבית, ואת המסך יש למקם כך שיהיה ניצב אל קרן האור (שלא יהיה בזווית אליה כדי שנוכל לדעת מתי הגענו לפוקוס במערכת). הציר והגובה של שאר הרכיבים מקובע על ידי החיבורים שלהם אל הרוכבים ולכן אינם ניתנים לשליטה.
- ב. כיצד תחשבו את השגיאות של הגדלים אותם תמדדו בניסוי? (גם לצורך כך, **תוכלו להיעזר בנספח א' של תדריך הניסוי**)

הנחיות לעיבוד תוצאות ושאלות להתייחסות בדו"ח

מדידה ישירה:

התייחסו אל שני אורכי המוקד שקיבלתם. האם הם שווים? מה זה אומר על ההנחה כי בניין שרייבר ממוקם באינסוף? (אין צורך להשוות בין הגדלים באופן כמותי, רק באופן איכותי) ערך אורך המוקד ממדידה זו ישמש בתור הערך התיאורטי של אורך מוקד העדשה עבור החלקים הבאים.

מדידה העקיפה:

1. את המדידות ביצענו בצורה כזו שתחילה קבענו את מיקום העדשה המרכז, ואז הזזנו את המסך על מנת למצוא עבורו את טווח בו הדמות נראית בפוקוס. ניתן היה, במקום זאת, לקבע את המסך בנקודה מסויימת, ולהזיז את העדשה על מנת למצוא את הטווח בו הדמות נראית בפוקוס. מדוע לא ביצענו כך את הנתונים? כיצד השגיאות של המרחקים השונים יהיו שונות בין שתי דרכי המדידה הללו?

2. בהסתמך על הנתונים אותם מדדתם בניסוי, שרטטו גרף לינארי של $\frac{1}{v}$ כפונקציה של

$\frac{1}{u}$. מהו שיפוע הגרף ע"פ התיאוריה? מה משמעות נקודת החיתוך עם הצירים? איך

תחשבו את שגיאת הצירים?

2. מההתאמה הלינארית שביצעתם מיצאו את אורך המוקד של העדשה המרכזת ושגיאתו. השוו את אורך המוקד שהתקבל אל אורך המוקד שקיבלתם במדידה הישירה באמצעות מדד $N\sigma$.

3. שרטטו גרף לא ליניארי של v כפונקציה של u . מה תהיה הפונקציה אליה נתאים את המדידות? כיצד ניתן לקבל ממנה את אורך המוקד ושגיאתו? השוו את אורך המוקד המתקבל מההתאמה אל אורך המוקד שקיבלתם במדידה הישירה באמצעות מדד $N\sigma$.

4. שרטטו גרף ליניארי של גובה הדמות h כפונקציה של $\frac{v}{u}$. גרף זה מתאר את ההגדלה הקווית. איך מחשבים את השגיאה של גדלים אלו? מה מייצג שיפוע הגרף? מצאו מההתאמה את גובה העצם H והשוו אותו לערך שמדדתם בצורה ישירה באמצעות מדד $N\sigma$.

חלק ב' – מדידת אורך מוקד של עדשה מפזרת

ביצוע המדידות

1. בדומה לחלק הקודם (מדידת אורך המוקד של עדשה מרכזת באופן עקיף), גם בחלק זה נערוך 2 התאמות למדידות: התאמה לינארית והתאמה לא לינארית, שמהן נוכל לחשב את אורך המוקד של עדשה מפזרת בדרך עקיפה.
2. בחלק זה תשתמשו באותה עדשה מרכזת שבה השתמשתם בחלק הקודם, וגם בעדשה נוספת, עדשה מפזרת, שתבחרו מסט העדשות.
3. הרכיבו את מערכת הניסוי כמו בחלק הקודם, באופן כזה שתקבלו דמות מפוקסת על המסך, וגם שיהיה מרחק בין העדשה למסך שבו תוכלו לשים רוכב נוסף על הבסיס. שימו לב לא לבחור קונפיגורציה שבה המסך נמצא רחוק מידי משאר הרכיבים במערכת. הרכיבו את הרכיבים כך שיהיו בצד הימני של הבסיס האופטי (הצד עם מקור האור). זאת על מנת לאפשר מספיק מקום למדידות בחלק זה. לאחר שהמערכת מסודרת וניתן לראות את הדמות בפוקוס, מדדו את מיקום העדשה המרכזת ואת מיקום הדמות המתקבלת על המסך (גם כאן, שימו לב כי קיים טווח מרחקים). בחלק זה של הניסוי, אין להזיז את השקופית ואת העדשה המרכזת, ולכן ניתן לקבע את שתיהן לבסיס האופטי.

4. כעת הכניסו עדשה מפזרת בין העדשה המרכזת לבין המיקום בו מתקבלת הדמות (מיקום המסך). שימו לב! כעת העדשה המפזרת, כשמה, מפזרת את קרני האור שמגיעות אל הדמות, ולכן לא ניתן יותר לראות דמות על המסך. לכן חשוב מאוד

לרשום את מיקום הדמות המקורית (שזהו מיקום המסך עליו נראתה הדמות המפוקסת לפני הכנסת העדשה המפזרת למערכת). מיקום זה ישמש אתכם לצורך חישוב המרחקים הרלוונטיים בעיבוד הנתונים.

5. הזיזו את העדשה המפזרת בתחום שבין העדשה המרכזת ומיקום הדמות המקורית, שכעת הפכה לעצם **מדומה** עבור העדשה המפזרת. חשוב מאוד לא לעבור את המיקום העצם המדומה! כאשר אתם מזיזים את העדשה המפזרת אתם בעצם קובעים את u . לכן, לכל u שקבעתם יש להזיז את המסך באותה הצורה כמו בחלק הקודם לשם מציאת הטווח בו הדמות נראית בפוקוס על המסך.

6. בצעו לפחות 5 סטים של מדידות, כך שכל סט הוא מדידה של מיקום העדשה המפזרת ומיקומי המסך בקצוות טווח הפוקוס.

7. שימו לב, אין ברצוננו לבדוק את נכונותה של נוסחת ההגדלה בחלק זה, ועל כן **אינכם נדרשים** למדוד את גובה הדמות בכל פעם כפי שעשיתם בחלק הקודם.

טיפים לביצוע המדידות

1. חישובו על ניצול מיטבי של הבסיס האופטי בביצוע המדידות. (ייתכן שתדרשו לאורך כולל יחסית ארוך של בסיס אופטי)

2. לא כל שקופית מתאימה להיות עצם עבור חלק זה של הניסוי. בחרו שקופית כך שהתחום בו הדמות נראית מפוקסת הוא הקטן ביותר על מנת להקטין את השגיאות של המרחקים התלויים בגודל טווח הפוקוס. בנוסף, כמו בחלק הקודם, הקפידו לסדר את המערכת כך שכל הרכיבים נמצאים באותו הציר וקרן האור עוברת דרך כל העדשות.

הנחיות לעיבוד תוצאות ושאלות להתייחסות בדו"ח

3. בהסתמך על הנתונים אותם מדדתם בניסוי, שרטטו גרף ליניארי של $\frac{1}{v}$ כפונקציה

של $\frac{1}{u}$. ממנו תוכלו לחשב את אורך המוקד ושגיאתו. מהו שיפוע הגרף לפי

התיאוריה? מה משמעות נקודות החיתוך עם הצירים? איך תחשבו את שגיאות הצירים? שימו לב להגדרה של v ושל u , האם הם חיוביים או שליליים?

4. מההתאמה שביצעתם למדידות מצאו את אורך המוקד של העדשה ושגיאתו. שימו לב לסימן אורך המוקד של העדשה המפזרת. השוו בין אורך המוקד שקיבלתם אל הערך התיאורטי שתקבלו ממדריך/ת המעבדה באמצעות מדד $N\sigma$.

5. שרטטו גרף לא ליניארי של v כפונקציה של u . איזה פונקציה יש לכתוב? איך ניתן לקבל ממנה את אורך המוקד ושגיאתו? השוו את אורך המוקד המתקבל מההתאמה לאורך המוקד התיאורטי באמצעות מדד $N\sigma$.

נספח א' – הערכת השגיאות בניסוי

במהלך הניסוי, רוב המדידות שלנו, כאמור, הן של מיקום הרוכבים על גבי הבסיס האופטי. מיקומים אלה הם של העדשות, המקור, והמסך. לכן חשוב לשים לב:

1. כאשר אנחנו נדרשים למצוא את מיקומי הרוכבים עבורם מתקבלת דמות ממוקדת, עלינו לבחון את היות הדמות ממוקדת: לאורך איזה קטע על גבי הבסיס האופטי, אם נזיז את המסך כאשר הדמות נראית ממוקדת, היא עדיין תראה ממוקדת? שימו לב! שגיאה זו רלבנטית רק למיקום המסך (או למיקום דמות שהייתה מתקבלת על מסך, במידה והיה שם. משפט זה תקף למקרים בהם אנחנו רוצים לייצר דמות שתהיה אחר כך עצם מדומה), ולמרחקים הכוללים הפרש בין נקודה כלשהי לבין המסך. יחד עם זאת, טווח שגיאה זה עשוי בהחלט להשתנות בין עדשות, ואפילו בין תחומי מדידה שונים עבור אותה עדשה.

2. קודם לכן, ראינו כי לצורך נוחות הקריאה, ניתן לקרוא את מיקום הרוכב על גבי הבסיס בצידו, ולא באמצעו. כמובן שזה תקף רק אם הרוכבים זהים. ניתן לבדוק הנחה זו. אולם, למעשה טמונה כאן נקודה יותר עדינה – יש לבדוק אם מיקום הרכיב בו אנו משתמשים בכל רוכב אכן נמצא במיקום יחסי זהה לצד של הרוכב ממנו מבצעים את המדידה. שונות בכך עשויה לבוא לידי ביטוי עקב היות הרכיבים שונים, הרכבת הרכיבים כשצד אחד או הצד השני מופנה לכיוון מערכת המדידה, או בשל אופן חיזוק הברגים. לשם פשטות תוכלו להניח כי כל הרוכבים עימם תעבדו זהים (מדוע?).