

חקירת תכונות של פולסים בעזרת ניתוח סרטוני וידאו

עדי רוזן, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות

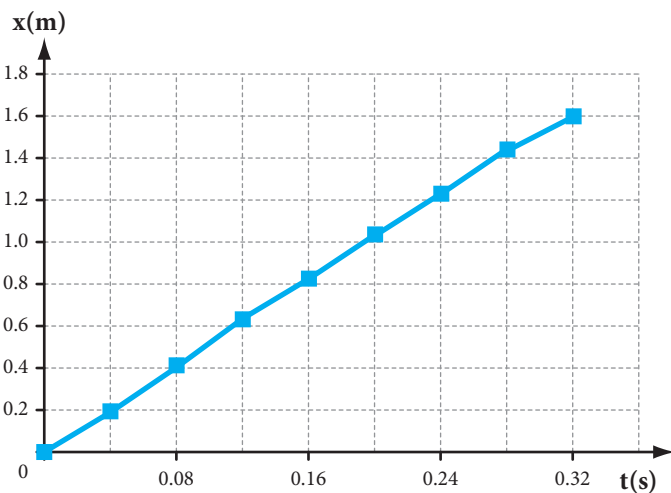
על הרצפה, סמוך לקפיץ ובמקביל אליו, הנחתי סרגל שאורכו 1 מטר. בתרשימים 1 ו-2 מוצגות שתי תמונות עוקבות של הסרטון (בתמונות רואים גם את הסרגל). ניתחתי את תנועת הפולס בעזרת התוכנה Videoexpl²: הגדרתי בעזרת התוכנה ציר x שכיוונו החיובי ימינה. בעזרת הסרגל המופיע בתצלומים קבעתי קנה מידה למרחקים, לאחר מכן, סימנתי, תמונה אחר תמונה, את עקבותיו של שיא הפולס, שהוא נקודת ייחוס טובה של הפולס. כיוון שהמצלמה צילמה בקצב של 25 תמונות בשנייה - מרווח הזמן שבין צילום אחד לצילום העוקב הוא 0.04 שנייה.

תוצאות המדידות של מיקום הפולס לאורך הציר x, ברגעים השונים, t, רשומות בטבלה (את ערכי x עיגלתי לשתי ספרות אחרי הנקודה העשרונית).

0.32	0.28	0.24	0.20	0.16	0.12	0.08	0.04	0	t (שנייה)
1.66	1.46	1.25	1.05	0.84	0.64	0.42	0.20	0	x (מטר)

טבלת מקום-זמן של תנועת שיא הפולס

הערה: תנועת הפולס היתה מנוגדת לכיוון החיובי של ציר ה-x שהוגדר בתוכנה. התוצאות המוצגות כאן הן לאחר החלפת הסימן האלגברי של ערכי ה-x, פעולה השקולה להפיכת כיוון הציר.



תרשים 3: גרף מקום-זמן של שיא הפולס

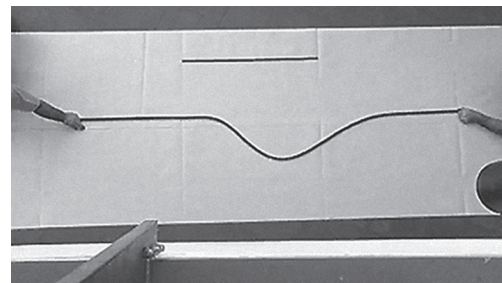
ההתאמה בין הנקודות שהתקבלו בניסוי, לישר המתאים ביותר (לקו הרגרסיה), היא מצוינת - ריבוע מקדם המתאם הוא

פולס המתפשט לאורך קפיץ אחיד מתאפיין בכך שתנועתו קצובה. תכונה זו נשארת תקפה גם אם משרעת הפולס הולכת וקטנה כתוצאה מחיכוך בין הקפיץ לבין המשטח שעליו מונח הקפיץ. בכיתה אנו נוהגים להצהיר על תכונה זו, אולם, חשוב לערוך מדידה כמותית, כי תלמידים רבים מאמינים שמהירות הפולס הולכת וקטנה בגלל החיכוך.

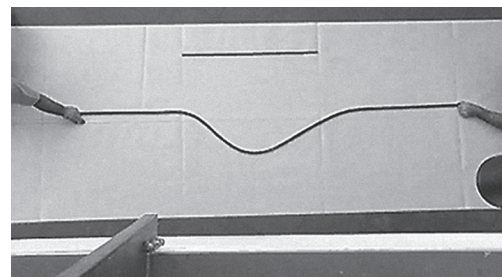
בשנה שבה לימדתי לראשונה אופטיקה, העמדתי תלמידים עם שעוני עצר בידיהם לאורך קפיץ סלינקי ארוך, שמאחד מקצותיו שיגרת פולס רוחב, והתלמידים מדדו זמנים. לרוע המזל, תוצאות המדידות היו כל כך גרועות, שוויתרתי על שיטת מדידה זו.

ברצוני להציג ניסוי פשוט וישיר, לחקירת סוג התנועה של פולס המתפשט לאורך קפיץ:

צילמתי, עם מצלמת וידאו דיגיטלית, פולס רוחב המתפשט שמאלה לאורך קפיץ ארוך. סרטון הווידאו, וסרטונים אחרים של פולסים, מופיעים בתקליטור המלווה את הספר "מודלים של האור - פעילויות" (1).

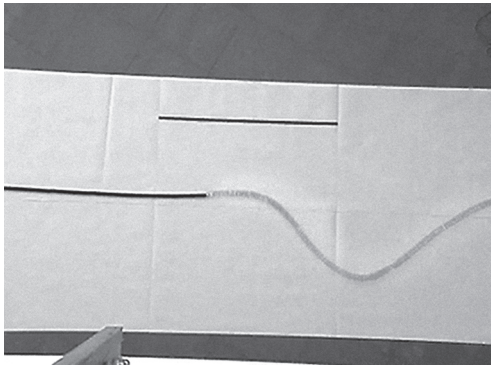


תרשים 1: תצלום הפולס ברגע מסוים

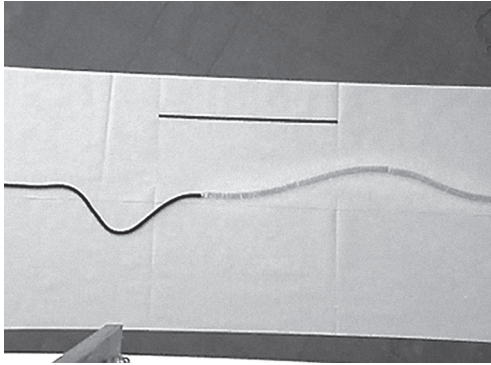


תרשים 2: תצלום הפולס בתמונה העוקבת (כעבור 0.04 שנייה)

בחרתי בקפיץ "כבד" (כלומר כזה שיש לו מסה גדולה ליחידת אורך) כדי שהפולס ינוע באופן יחסי לאט, וכך יהיו בסרטון מספיק תמונות לניתוח משמעותי.



תרשים 5: תצלום של פולס נע שמאלה לאורך קפיץ "קל", לעבר קפיץ "כבד"



תרשים 6: תצלום פולס מוחזר ופולס עובר

לזכוכית. יתר על כן, אפשר לראות מתרשים 6, שהפולס המוחזר לקפיץ ה"קל", עובר מרחק גדול יותר (מנקודת הקשר) מאשר הפולס העובר לקפיץ ה"כבד". שני הפולסים "נולדו" בו-זמנית, מכאן נובע שבקפיץ ה"קל" פולס נע מהר מאשר בקפיץ ה"כבד", בהתאמה לקשר (1) לעיל.

מהתצלומים אפשר גם ללמוד כי הפולס העובר לקפיץ ה"כבד" אינו מתהפך, ואילו הפולס המוחזר לקפיץ ה"קל" מתהפך, בדומה לפולס המוחזר מקצה קשור של קפיץ.

אמנם, אפשר (וחשוב) לצפות בתופעות כגון מעבר פולס מתווך אחד למשנהו גם במציאות, ללא צילום הפולסים בווידאו. אך הניסיון שלי מצביע על כך שהיכולת לצפות במתרחש תמונה אחר תמונה, לצד התבוננות ישירה בתופעה עצמה ברצף, עשויה להגביר את ההבנה.

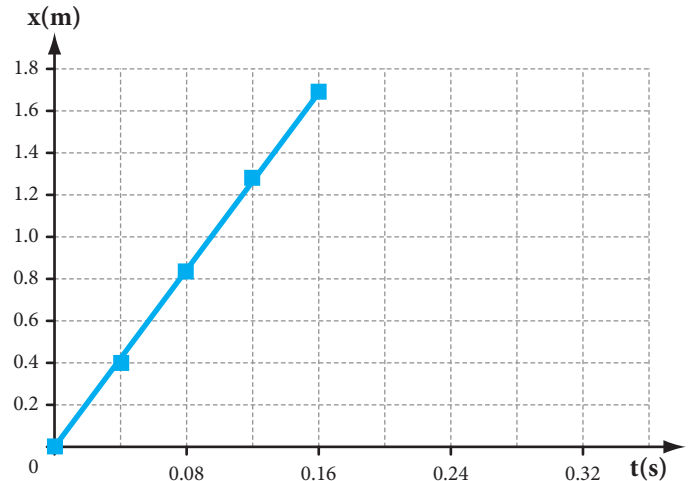
מראי מקום

1. רזון, ע. (2005). מודלים של האור - פעילויות. המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות, תקליטור.
2. רזנפלד, ש., פעילויות מתקדמות בנייתו וידאו, הוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 2006.
3. Ohanian H.C. (1989). Physics, W. W. Norton & Company, New York. p. 419.

תהודה

$R^2 = 0.9998$. מידת ההתאמה הגבוהה של הנקודות לקו הרגרסיה הפתיעה אותי לטובה. משוואת הקו הישר, לאחר השמטת ספרות לא משמעותיות, היא $x = 5.20t$ כאשר הגדלים מבוטאים ביחידות SI. כלומר לפולס מהירות קבועה אשר גודלה 5.20 מטר לשנייה.

בסרטון אחר, מצולם פולס הנע לאורך אותו קפיץ, לאחר שמתחתי אותו בשיעור של כעשרים ס"מ נוספים. גם הפעם התקבלה תנועה שוות-מהירות, כפי שאפשר לראות מגרף מקום-זמן המוצג בתרשים 4, המתאר את תנועת שיא הפולס.



תרשים 4: גרף מקום-זמן של שיא פולס המתפשט לאורך הקפיץ, כשזה היה מתוח כ-20 ס"מ יותר מאשר במצב המתואר בתרשים 3

אפשר לראות מתרשימים 3 ו-4 כי מהירות הפולס גדולה יותר כאשר הקפיץ מתוח יותר. תוצאה זו עומדת בהתאמה לתוצאת ניתוח תיאורטי, שממנו נובע שמהירות פולס רוחב לאורך קפיץ

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1) \quad \text{נתונה על ידי הקשר}^3:$$

כאשר T מתיחות הקפיץ, ו- μ היא מסת ליחידת אורך. (כאשר מותחים קפיץ - מגדילים את מתיחותו, T , ובנוסף לכך

מקטינים את מסתו ליחידת אורך, μ).

שימוש נוסף בשיטה של ניתוח סרטוני וידאו הוא בתופעות כגון מעבר פולס חד-ממדי מתווך אחד למשנהו.

תרשים 5 הוא תצלום של פולס הנע שמאלה לאורך קפיץ "קל" לעבר קפיץ "כבד".

תרשים 6 הוא תצלום המערכת זמן קצר לאחר שהפולס המוצג בתרשים 5 הגיע לנקודת הקשר של שני הקפיצים.

מתרשים 6 אפשר לראות כי לאחר שהפולס הגיע לקשר הוא מתפצל לשניים: פולס עובר ולפולס מוחזר. תופעה זו דומה לתופעה של אלומת אור המתפשטת באוויר ופוגעת בזכוכית - מתפצלת לאלומה המוחזרת לאוויר ולאלומה העוברת