



החוק השני של ניוטון בתנועה מעגלית

אנאון רופן וויטלי אינרנאוס, בית הספר התיכון בליק, רמת-טן

תקציר

במאמר זה מתואר ניסוי שבו מנתחים תנועת גוף הנע בתנועה מעגלית. בניסוי זה ניתן למדוד ישירות, ובעת ובעונה אחת, הן את הכוח והן את התאוצה. עיבוד התוצאות בניסוי פשוט בגלל השימוש במערכת V-scope בתוספת הגיליון האלקטרוני "פסיפס".

מילות מפתח:

החוק השני של ניוטון, תנועה מעגלית, מערכת V-scope, גיליון אלקטרוני "פסיפס".

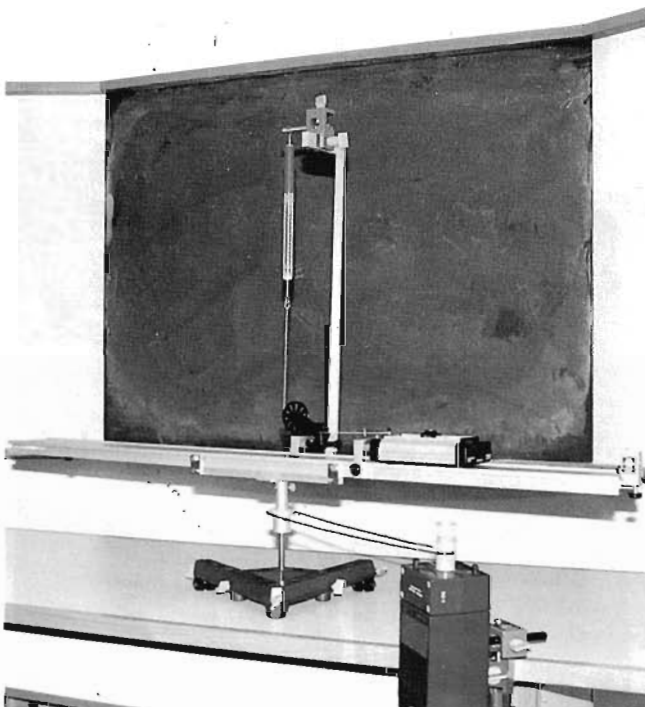
הניסוי המוצע כאן חוקר תנועה מעגלית במישור אופקי. התנועה עצמה נמדדת בעזרת מערכת V-scope, בדומה לניסוי המתואר בחוברת הניסויים של ה-V-scope⁽¹⁾, אלא שבניסוי זה נמדד גם הכוח הצנטריפטלי הפועל על הגוף המסתובב. יופיו של הניסוי נעוץ בהבלטתו של הכוח הדרוש לצורך הסיבוב, ובאישורו של החוק השני של ניוטון. לא בכל יום מזדמן לנו להניע גוף בתאוצה ולמדוד בצורה "נקייה" הן את תאוצתו והן את הכוח הפועל עליו.

תיאור מערכת הניסוי

גוף (עגלת דינמיקה) נע בתנועה מעגלית במישור אופקי. את הכוח המרכזי הדרוש לתנועה מספק חוט הקשור לגוף והעובר דרך גלגילה, המוצמדת לציר הסיבוב. חוט זה מתחבר בסופו של דבר לדינמומטר קפיצי. הדינמומטר מונח על הציר עצמו במצב זקוף, ומסתובב יחד עם הציר כדי למנוע פיתול של החוט. כיוון שהדינמומטר שקוף, אין בעיה לקרוא את הוראתו.

אנו השתמשנו כבסיס לניסוי בערכת הדינמיקה של Pasco⁽²⁾. יתרונותיה של ערכה זו הם הממדים והמשקל המתאימים שלה, מקדם החיכוך הנמוך בין העגלה למסלול, המסלול המחורץ המאפשר תנועה של העגלה רק בכיוון הרדיאלי ואיכותה הגבוהה של הגלגילה המסופקת עם הערכה.

כדי שאפשר יהיה לסובב את המערכת התקנו מתחת למסלול, במרכז הכובד שלו, ציר אנכי. מעל למסלול, שוב במרכז הכובד, התקנו תורן⁽³⁾. אל קצהו העליון מקובע הדינמומטר ואל קצהו התחתון מחוברת הגלגילה (ראה תרשים 1).



תרשים 1: תצלום מערכת הניסוי

סיבוב המערכת נעשה בעזרת מנוע מעבדתי⁽⁴⁾. למנוע זה מוצמד ממסר, אשר יחס הסיבובים שלו 1:30, ציר אנכי מסתובב, ורצועת הנעה המחברת ביניהם. למרכז הכובד של העגלה מחובר כפתור V-scope; המגדלים "מסתכלים" עליו מלמעלה, במצב תלת ממדי אופקי.

ביצוע הניסוי

שני החלקים הראשונים של הניסוי עוסקים בקינמטיקה של התנועה המעגלית. נחקר בעיקר הקשר:

השלב הבא של הניסוי עוסק בקשר בין הכוח הפועל על הגוף, לבין תאוצתו. משנים כל פעם את תדירות הסיבוב, מחכים עד שהמערכת תתייצב, ומוודדים את הכוח ואת התאוצה. הכוח נמדד באופן ישיר על פי הוראת הדינמומטר. את התאוצה אפשר למדוד או על ידי העברת ה-V-scope למצב Review והילוך חוזר של המדידה, או על ידי מדידה של הרדיוס ושל זמן המחזור וחישוב התאוצה בעזרת נוסחה (1).

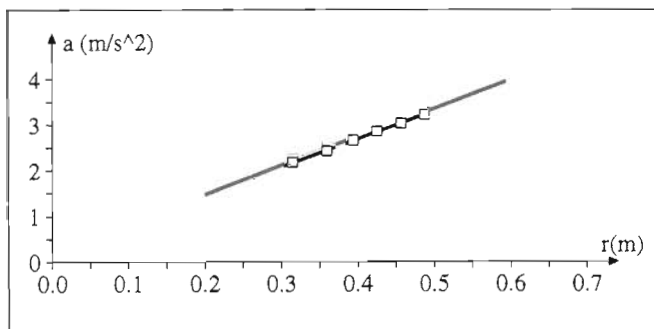
$$a_r = \omega^2 r \quad (1)$$

בחלק הראשון נמדדת התאוצה כפונקציה של ω , כאשר r קבוע, ובחלק השני נמדדת התאוצה כפונקציה של הרדיוס r כאשר ω קבוע. חלק חשוב של הניתוח הקינמטי יעשה על סמך רישום ידני של חמש נקודות מדידה עוקבות, חישוב שלוש מהירויות עוקבות בעזרתן, וחישוב ווקטור התאוצה בנקודה האמצעית. התלמיד מתבקש לסרטט, בקנה מידה, את המסלול, את ווקטור המהירות ואת ווקטור התאוצה (5). הקפדה על ביצוע מדויק של חלק זה של הניסוי מבהירה לתלמיד את כיוונה המשיקי של המהירות, ומה שעוד יותר חשוב, את כיוונה הרדיאלי של התאוצה. חשוב לבצע חלק זה באופן ידני כדי שהתלמיד יוכל לעמוד על הדרך בה מחושבים, על פי הקואורדינטות הנמדדות, ווקטורי המהירות והתאוצה.

עיבוד התוצאות

1) הקשר בין a ל- r כאשר ω נשמרת קבועה

הגרף שבתרשים 3 מתאר את התאוצה הרדיאלית כפונקציה של הרדיוס, כאשר זמן המחזור נשמר קבוע וערכו הוא: $T=2.43s$. כדי לשנות את הרדיוס חיברנו לראש התורן מתקן שבעזרתו ניתן לכוון בעדינות את אורך החוט מן הגלגילה אל העגלה (ראה תרשים 2). התאוצה חושבה על ידי מיצוע של גודל ווקטור התאוצה כפי שהוא מחושב בתוכנת ה-V-scope לאורך סיבוב שלם. בתרשים 3 מתוארת התאוצה כפונקציה של הרדיוס.

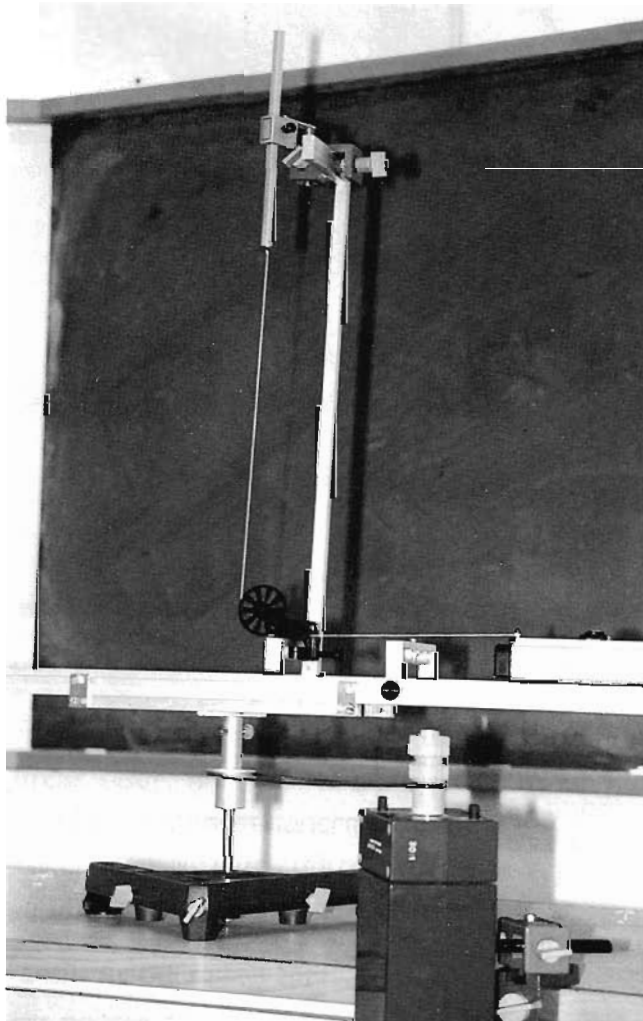


תרשים 3: התאוצה כפונקציה של הרדיוס

קירוב לינארי של הגרף נותן שיפוע של $\omega^2 = 5.87 s^{-2}$, עם סטיית תקן של 0.02. זמן המחזור המתקבל מהשיפוע הוא: $T=2.59s$, עם סטייה של כ-6%.

2) הקשר בין a ל- ω כאשר r נשמר קבוע.

שמרנו על רדיוס קבוע של $R=0.5m$, ושינינו את זמן המחזור בתחום שבין $T=1.84s$ לבין $T=3.93s$. בתרשים 4 נתון הגרף המתאר את התאוצה כפונקציה של ω^2 . גם כאן ערך התאוצה המופיע בגרף הוא ממוצע לאורך סיבוב שלם.



תרשים 2: תצלום המתקן להכוונת אורך החוט

סיכום

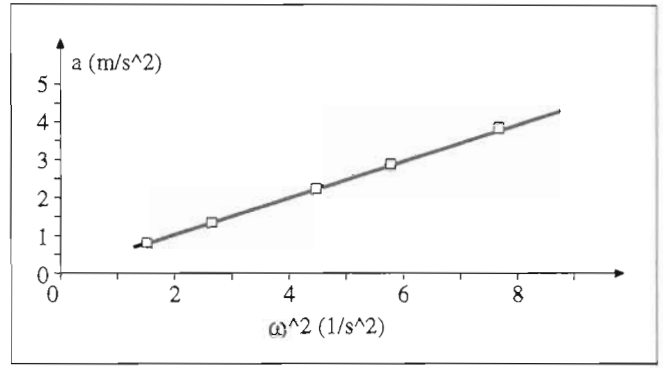
תיארנו כאן ניסוי שאנו מאמינים שיש לו ערך רב בהוראת התנועה המעגלית בפרט, ובהוראת המכניקה בכלל, שכן הוא מקיף היבטים רבים שלה. חשיבות מיוחדת אנו מיחסים למשמעות הווקטורית של הגדלים הפיסיקליים הקשורים בניסוי: כוח, מהירות ותאוצה, ולסרטוטם על ידי התלמיד לפני הצגתם על צג המחשב (ראה תרשים 6).



תרשים 6: תצלום צג מחשב

בנוסף להיותו ניסוי המתאים לתלמיד במעבדה, יש מקום להשתמש בו כניסוי הדגמה (בעזרת מצגת מחשב) בעת לימוד הנושא בכיתה.

המערכת הניסויית, יחד עם אביזרים נוספים הנמצאים ממילא במערכת, מעוררת רצון לבצע ניסויים נוספים, מורכבים יותר, המתאימים לפרוייקטים של תלמידים. נמנה כאן רק אחדים מהם, הקשורים לחקר חוקי המכניקה במערכות לא אינרציאליות. בניסויים אלו כדאי להשתמש בתוכנת "Frames" (6) המייבאת קבצים שנרשמו על ידי ה-V-scope ומנתחת אותם מנקודת מבט של מערכות ייחוס שונות. את המערכת המסתובבת ניתן להגדיר על ידי הצמדת כפתור V-scope נוסף אל המסלול המסתובב והצגת התנועה הנחקרת ב-"Frames", מנקודת מבטו של כפתור זה. להלן מובאות דוגמאות לניסויים מסוג זה:

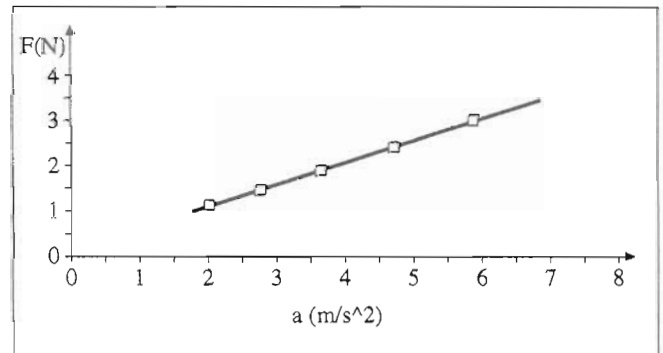


תרשים 4: התאוצה כפונקציה של ω^2

קירוב לינארי של הגרף נותן שיפוע של $R=0.48m$ עם סטיית תקן של 0.02, כלומר סטייה של 4% מהערך המדוד. הקשר $a_r = \omega^2 r$ מבוסס כעת, ואפשר לגשת לאישור החוק השני של ניוטון. עתה חיברנו לראש התורן את הדינמומטר. השתמשנו בדינמומטר שרגישותו 0.3N. הוא מסתובב על הציר, אבל נייח ושקוף, ולכן הקריאה בו נוחה.

3) הקשר בין F ל- a

הגרף שבתרשים 5 מתאר את הכוח הרדיאלי הפועל על העגלה כפי שהוא נמדד ישירות על ידי הדינמומטר, כפונקציה של התאוצה. הפעם מערכת ה-V-scope מודדת את הרדיוס ואת זמן המחזור ואילו התאוצה מחושבת בעזרת נוסחה (1). הקשר בין התאוצה לכוח נתון בגרף שבתרשים 5.



תרשים 5: הכוח כפונקציה של התאוצה

הגרף מאשר, ללא ספק, את החוק השני של ניוטון בתנועה מעגלית. קירוב לינארי של הגרף נותן שיפוע של $m=0.491kg$, עם סטיית תקן של 0.045. מדידת מסת העגלה בעזרת מאזניים הורתה על $m=0.518kg$, כלומר סטייה של כ-5%.

א) **שימור תנע**. מציבים שתי עגלות (כשלכל אחת מוצמד כפתור V-scope) על המסלול המסתובב ומייצרים התנגשויות ביניהן. התנועה וחוק שימור התנע נחקרים הן במערכת המעבדה והן במערכת המסתובבת.

ב) **החוק השני של ניוטון**⁽⁷⁾. העגלה מחוברת על ידי קפיץ מתוח לציר הסיבוב, וקשורה בעזרת חוט דק לקצה החיצוני של המסלול. שורפים את החוט ומודדים את תנועת העגלה כלפי המרכז ומנתחים אותה במערכת המסתובבת.

ג) **תנועה הרמונית**. קושרים את העגלה לשני קפיצים המחוברים האחד למרכז הסיבוב, והשני לקצה החיצוני של המסלול. מוציאים את העגלה ממצב שיווי המשקל ומודדים את התנועה.

נשמח לעזור ולספק פרטים נוספים לכל מי שיפנה אלינו.

מראי מקום והסברים

1. רונן, מ., ורוזן, א. קובץ תדריכים לניסויי מעבדה, מהדורת ניסוי, 1991.
2. מסלול הרצה, שתי עגלות ואביזרים.
3. התורן מתחבר למסלול בעזרת מחסום נייד המסופק עם המערכת.
4. מתוצרת PHYWE.
5. חישוב הווקטורים נעשה על-פי:

$$v_x = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t}, \quad v_y = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta t}$$

6. רונן, מ. ופרנקל, ל., *Frames* תוכנית לקנימטיקה ומערכות ייחוס, תהודה, כרך 15, מס' 1, עמ' 36-43.
7. ניסוי של חקר החוק השני של ניוטון בתנועה בהשפעת קפיץ במערכת המעבדה מתואר על ידי מר רלו שוורץ במאמר המופיע בחוברת זו.