

תנועות סימולטניות ואקורדים מרחביים בכתב התנועה אשכול-וכמן

נועה אשכול וג'ון האריס

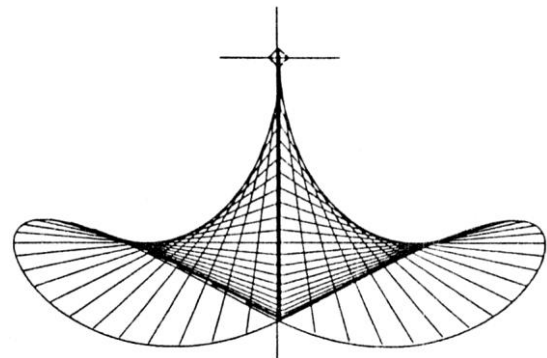
עברית: מיכל שושני

תמצית

מתנועות בו זמניות של כמה אברים נוצרים מסלולי תנועה שהם תוצאה של יחסי הגומלין בין התנועות של כל אבר בנפרד. מסלולים אלו יכוננו להלן 'אקורדים מרחביים'. ייבחנו כמה מהצירופים היותר פשוטים המייצרים תנועה סימולטנית ותוצגנה דוגמאות של 'אקורדים מרחביים'.

מבוא

המונח 'אקורד מרחבי' אשר אנו מחילים על תנועה שאול מהמוסיקה, שבה הצליל הנשמע מצירופם של טונים בודדים יוצר תופעה השונה ממרכיביה הנפרדים. אפשר לפרק אקורד מוסיקלי למרכיביו. אפילו טון אחד מורכב מצבר של טונים עיליים. שני טונים או יותר, כאשר הם מושמעים בו זמנית, מעצימים או מעמעמים האחד את השני ונולדת תופעה חדשה. כך, באנאלוגיה, התנועה של איבר אחד בגוף, שהוא בעל קצה חופשי, יוצרת תמיד קטע ממעגל. אולם כאשר נעים שני אברים סמוכים (שיש להם מפרק משותף) באותו הזמן - כל אחד מהם מייצר אמנם חלק ממעגל, אך המסלול שמתקבל כתוצאה מתנועתם הסימולטנית, עשוי להיות מורכב ביותר, כיוון שמסלולו של איבר אחד מושפע ממסלולו של האבר אליו הוא מחובר במפרק משותף (ציור 1). אנו מציעים את הצעד הראשון והיסודי ביותר, בבקשנו דרך עקבית ופשוטה להבנת המסלולים התנועתיים הנוצרים כתוצאה מתנועה סימולטנית של איברים סמוכים בגוף האדם.



ציור 1. הדמיית מחשב של אקורד מרחבי

כדור התנועה

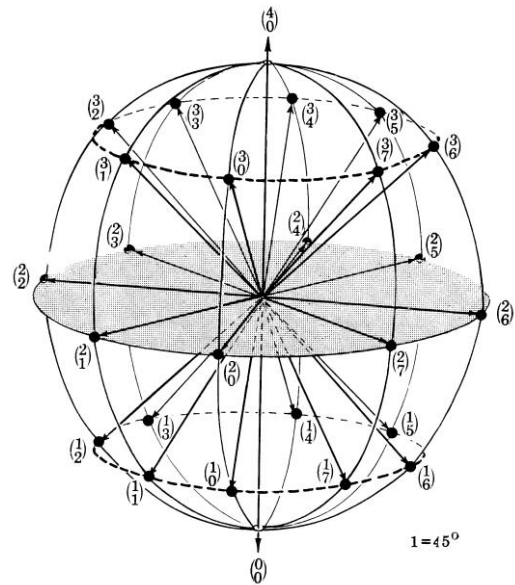
למטרות הכתב אנחנו מתייחסים לגוף האדם כאל מערכת של 'מוטות' ישרים (איברים), המחוברים זה לזה במפרקים. תנועה של הגוף כולו היא, איפה, סכום של תנועות האיברים הבודדים, כשם שתנוחה של הגוף כולו היא מקבץ פוזיציות של האיברים הנפרדים. בבואנו לנתח את תנועת הגוף, נפתח בניתוח התנועה של איבר יחיד. כל איבר נע מסביב למפרק אליו הוא מחובר. בתנועה זו (בהנחה שלאיבר יש חופש תנועה מלא במפרק) אפשר להבחין בשלושה מרכיבים:

(א) מרכז התנועה (מפרק).

(ב) ציר האיבר.

(ג) ציר התנועה.

אם מתייחסים למפרק כאל מרכז תנועה קבוע במרחב, ברור אז שכל תנועה של האיבר מתרחשת בתוך כדור.



ציור 2. מערכת הייחוס הכדורית

מערכת הייחוס לפוזיציות ולתנועות היא כדורית (ציור 2). המישור החוצה אותה באופן אופקי מחולק למרווחים שווים וכך נקבעים כיוונים אופקיים. על גבי הכיוונים האלה מוצבים מישורים אנכיים. כל מישור אנכי נחלק לאותם מרווחים אשר מחלקים את המישור האופקי. קווי החלוקה ממוספרים החל מ-0, שהוא הכיוון הנמוך ביותר על גבי המישור האנכי, או שהוא הכיוון הקדמי על גבי המישור האופקי. אנו מגדירים פוזיציות על ידי הצהרת המספר של המרכיב האופקי, המציין את שם המישור האנכי עליו נמצאת הפוזיציה, ומעליו את המספר של המרכיב האנכי – המציין את מקום הפוזיציה על גבי מישור זה. שני המספרים מוקפים בסוגרים. דוגמא: $(\frac{2}{0})$

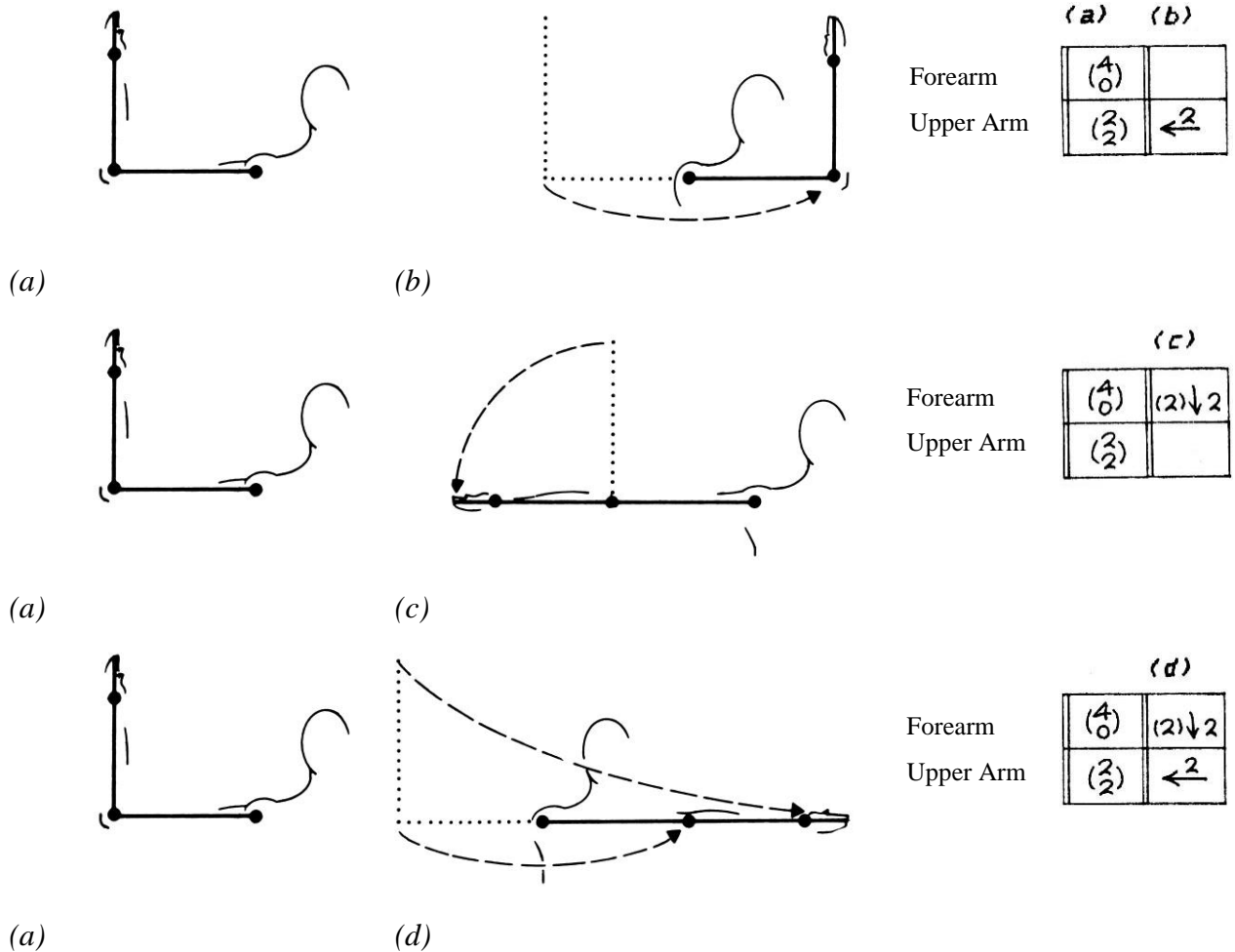
איברים 'קלים' ו'כבדים'

אפשר להתייחס לגוף כאל תזמורת. כל איבר מהווה כלי בודד. למרות שכל כלי עצמאי מכמה בחינות, מתקיימים קשרים פנימיים בין הכלים והם משפיעים זה על תנועתו של זה. ניקח לדוגמא את האמה, איבר המחובר בשני קצותיו לאיברים אחרים - בקצה אחד לזרוע ובקצה השני לכף היד. כאשר הזרוע נעה, היא גוררת עימה את האמה ואת כף היד המחוברת אליה, כלומר - היא משנה את יחסן של האמה ושל כף היד אל איברים אחרים בגוף. אולם אם כף היד נעה, היא אינה גוררת עימה את האמה. תנועת האמה אינה גוררת את הזרוע, אך גוררת את כף היד.

למטרותיו של הניתוח הנוכחי, דרגת העצמאות היחסית של האיברים תתואר באמצעות שימוש ציורי במונחים 'קל' ו'כבד': איבר הגורר איבר אחר ייחשב כבד יותר מאשר האיבר אותו הוא גורר. באופן כזה נחלקים האיברים לשתי קבוצות - 'כבדים' ו'קלים'. כל איבר הוא 'כבד' ביחס לכל איבר אותו הוא גורר והוא 'קל' ביחס לכל איבר שגורר אותו. במונחים 'קל' ו'כבד' אפשר להשתמש, אם כך, לגבי כל איבר והם מציינים האם האיבר נע באופן פעיל או באופן סביל.

במקרים רבים האיברים הקלים יותר משנים את יחסם למערכת הייחוס באופן פסיבי, כתוצאה מתנועתם של האיברים הכבדים יותר. ובכל זאת - איבר קל יותר, בשעה שהוא נגרר על ידי איבר כבד יותר, יכול לנוע גם באופן עצמאי ואין בכך סתירה של הכלל. המסלול שאיבר זה יוצר בזמן תנועתו הוא תוצאה של תנועה כפולה (ראה המחשה בציור 3). למעשה, יכול מסלול כזה להתקבל כתוצאה משלוש או ארבע תנועות בו זמניות כמו, למשל, כאשר כף היד נעה באופן עצמאי בזמן שהיא נגררת על ידי הזרוע, שנעה אף היא באופן עצמאי אך נגררת על ידי תנועה של בית החזה. בדרך כלל, בכתב התנועה אשכול-וכמן, תנועתו של כל איבר מנותחת כאילו האיבר הכבד 'נח'. יש לזכור שכל איבר יכול להיות בו בזמן גם כבד וגם קל או להשתנות במהלך רצף תנועתי - כבד ברגע אחד, קל במשנהו ולהיפך.

ציור 3. תנועה סימולטנית



(a) פוזיצית מוצא של האמה והזרוע.

(b) מפוזיציה (a), תנועה מישורית – אופקית בזרוע בלבד.

(c) מפוזיציה (a), תנועה מישורית – אנכית באמה בלבד.

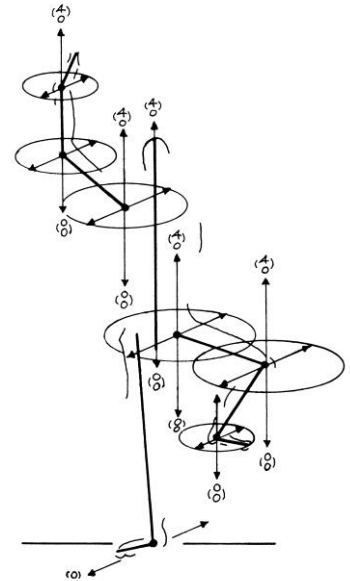
(d) מפוזיציה (a), שתי התנועות מבוצעות בו בזמן.

במאמר זה אנו עוסקים בשני איברים בלבד, אחד כבד ואחד קל, בדרגה נמוכה ביותר של תנועה סימולטנית: האבר הכבד נע בתנועה מישורית, קונית או רוטציונית; לאיבר הקל אין תנועה עצמאית, אך יחסו הזוויתי לאיבר הכבד קובע, בכל זאת, את הפוזיציה ואת המיקום שלו במערכת המתווה ויוצר מסלול נפרד ומובחן במרחב בזמן שהאיבר הכבד נע. שימו לב שאם איבר נמצא ביחס של 180 מעלות לשכנו בקבוצת האיברים והם יוצרים ביחד קו ישר – נרשמת הפוזיציה של האיבר הכבד בלבד, מכיון שהקבוצה כולה מתנהגת כאיבר יחיד.

מערכות ייחוס פרטיות

הפוזיציות והתנועות של כל איבר בגוף מתייחסות למערכת ייחוס (המערכת המתווה), שמרכזו במפרק סביבו נע האיבר. לפיכך, הגוף כולו נתפס כמבנה מרובה כדורים (פוליספירי). פוזיציה של איבר מוגדרת על ידי הקו (קואורדינטה) במערכת המתווה המזדהה עם ציר האיבר. מרכז המערכת המתווה הפרטית שלו מתלכד עם המפרק שבינו לבין האיבר הכבד הסמוך אליו כך, שהפוזיציה נקבעת כקו הנמתח מהמפרק "כלפי חוץ".

כאשר האיבר נגרר, לדוגמא - האמה על ידי תנועת הזרוע - הוא משנה, בהכרח, את מקומו במרחב. מערכת הייחוס הפרטית שלו נגררת אף היא על ידי האיבר הכבד (במקרה זה - הזרוע), היות שהמפרק בין שני האיברים מהווה את מרכזה של המערכת הפרטית של האיבר הפסיבי (במקרה זה - האמה). יחד עם זאת, הכוונון של המערכת המתווה אינו משתנה: המישור האופקי נשאר אופקי והמישור האנכי נשאר אנכי. יותר מכך, הכיוון (0) של המערכת הפרטית נשאר מקביל לכיוון שנבחר בהתחלה כ'אפס אבסולוטי' (ציור 4). כל זה שריר גם כאשר מתרחשת רוטציה של כל הגוף סביב הציר האנכי והוא משנה את חזיתו ביחס למערכת המתווה.



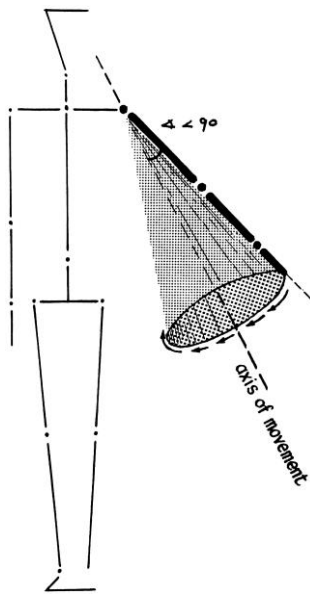
ציור 4. מערכות ייחוס פרטיות

תנועה סימולטנית

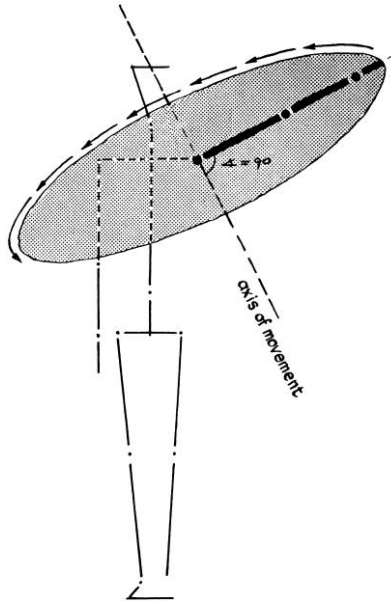
הדוגמאות הבאות מתייחסות לשני איברים סמוכים. ציר האיבר הכבד נע בשלושת סוגי התנועה:

- (א) רוטציה, בה ציר האיבר מתלכד עם ציר התנועה ולכן האיבר מסתובב סביב ציר התנועה מבלי לשנות את מקומו במרחב.
- (ב) תנועה מישורית בה ציר האיבר נע ביחס קבוע של 90 מעלות לציר התנועה שלו.
- (ג) תנועה קונית, בה הזווית בין ציר האיבר לציר התנועה היא כל זווית שאינה 90 מעלות או 0 מעלות.

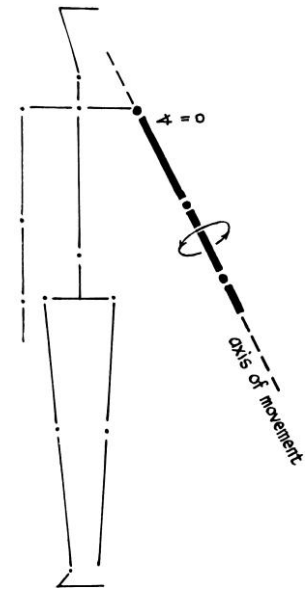
ציר האורך של האבר הקל אינו משנה את יחסו הזוויתי לציר האורך של האבר הכבד ממנו. מיקומו במרחב משתנה באופן פסיבי כתוצאה מתנועת האבר הכבד.



תנועה קונית



תנועה מישורית

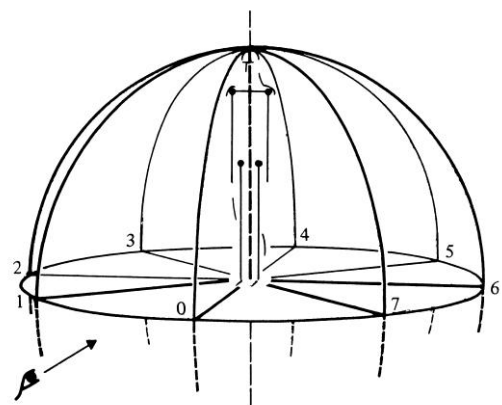


תנועה רוטציונית

ציור 5. שלושת סוגי התנועה

בדוגמאות הבאות ציר האיבר הקל נשמר באופן סטטי, בזוויות שונות, ביחס אל ציר האיבר הכבד. מקומו במרחב משתנה באופן פסיבי כתוצאה מתנועת האיבר הכבד. את הדוגמאות מלווים איורים של תנועת שני צירי האיברים, אותם פלט המחשב. המבט על האיורים הוא מזוויות שונות:

- (א) מלפנים, כלומר – מבט מכיוון (0) על גבי המישור האופקי אל כיוון (4), או
 (ב) מבט מהצד – מכיוון (6) על גבי המישור האופקי לכיוון (2), או
 (ג) מלמעלה – הסתכלות כלפי מטה על המישור האופקי; או
 (ד) מהאלכסון הקדמי – מבט אל כיוון (3) מכיוון (7). (ציור 6.)



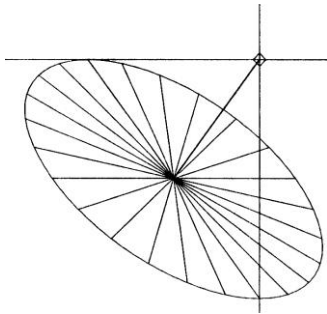
ציור 6. כיוונים על המישור האופקי

א. באיבר הכבד – תנועה רוטציונית (ציר האיבר מתלכד עם ציר התנועה).

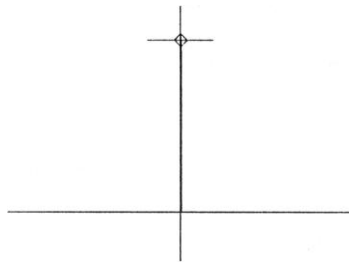
(1) האיבר הקל נמצא ביחס של 90 מעלות לאיבר הכבד.

האיבר הקל (הסטטי) נשמר בזווית של 90 מעלות ביחס לכבד. מעטפת מישורית נוצרת באופן פסיבי על ידי ציר האיבר הקל. מיקומו של מישור כזה (אופקי, אנכי או אלכסוני), נקבע על ידי פוזיצית המוצא של ציר האיבר הכבד, המוגדרת באמצעות המערכת המתווה. כיוון המישור הוא 90 מעלות ביחס לציר התנועה של האיבר הכבד.

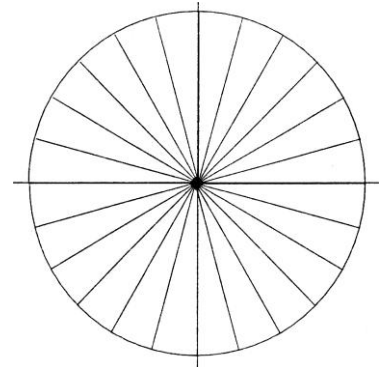
(ציורים 7, 8, 9).



ציור 9. מבט מלפנים



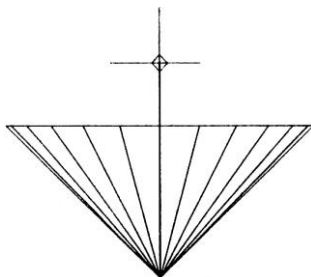
ציור 8. מבט מהצד



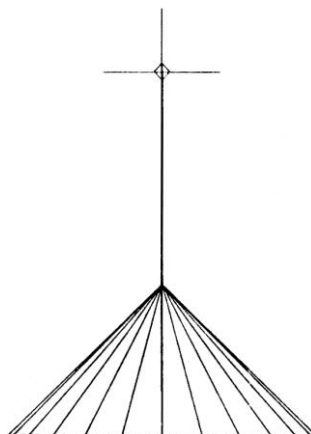
ציור 7. מבט מלמעלה

(2) האיבר הקל הוא בזווית שונה מ-90 מעלות:

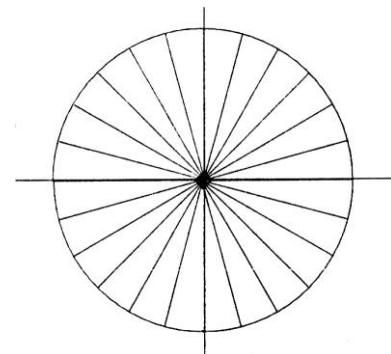
אם הזווית בין צירי האיברים תהיה גדולה או קטנה מ-90 מעלות (אבל גדולה יותר מ-0 מעלות), ציר האיבר הקל (הסטטי) יתווה באופן פסיבי מעטפת קונית. מיקומה של מעטפת זו נקבע על ידי פוזיצית האיבר הכבד המוגדרת באמצעות המערכת המתווה, והמסלול המעגלי של בסיסה יהיה, בהתאם לכך, אופקי, אנכי או אלכסוני (ציורים 10, 11, 12).



ציור 12. מבט מלפנים



ציור 11. מבט מהצד



ציור 10. מבט מלמעלה

דוגמאות אלה מספקות חיזוק לתקפותו של סיווג התנועה למישורים, קונוסים ורוטציות, שכן למרות שמוצגות כאן תנועות סבילות של האיבר הקל, אפשר לראותן כהדמיה של תנועות פעילות ה"מלוות", אפשר לומר, את ציר התנועה של האיבר.

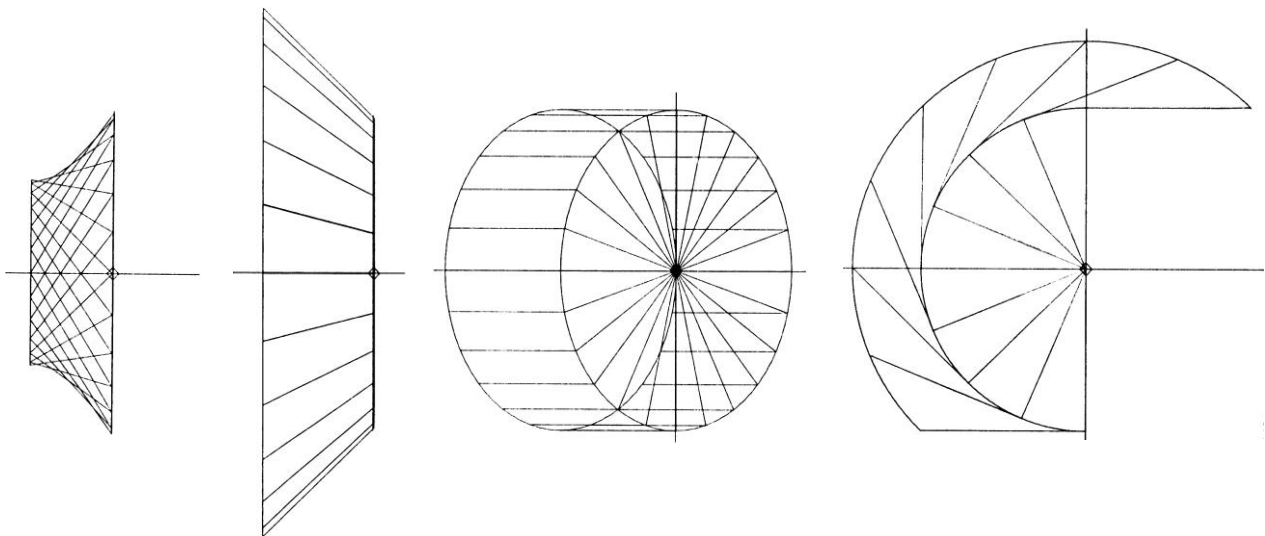
ב. באיבר הכבד תנועה מישורית (ציר האיבר נמצא ביחס של 90 מעלות לציר התנועה)

שימו לב שבכל שורה נתונה של פוזיציות לאיבר יחיד, תנועות מישוריות הן הדרך הקצרה ביותר מפוזיציה לפוזיציה.

אנו מביאים שלוש דוגמאות של מקרים בסיסיים, בהם האיבר הכבד נע במישור והאיבר הקל שומר על יחס קבוע אליו:

1) הפוזיציה של האיבר הקל היא באותו מישור של תנועת האיבר הכבד (שנמצא ביחס של תשעים מעלות לציר התנועה שלו):

במקרה זה, המסלול המשרטט על ידי האיבר הקל יהיה גם הוא מישורי. לדוגמא: האיבר הכבד מתחיל לנוע מהפוזיציה האנכית הנמוכה $(\frac{0}{0})$, והאיבר הקל נמצא בפוזיציה אופקית-קדמית $(\frac{2}{0})$. תנועה של 180 מעלות במישור הקדמי אל הפוזיציה האנכית הגבוהה $(\frac{4}{0})$ תגרור את האיבר הקל, באופן סביל, לפוזיציה האופקית-אחורית $(\frac{6}{0})$. הקצה המרוחק (החופשי) של האיבר הקל משרטט מעגל בעל מרכז משותף עם זה של הכבד (ציור 13).



ציור 16.

ציור 15.

ציור 14.

ציור 13.

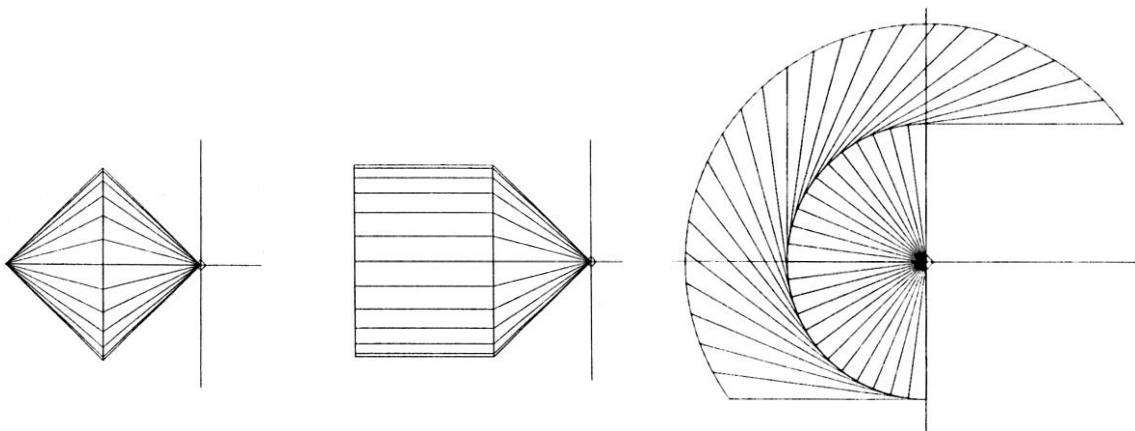
2) הפוזיציה של האיבר הקל מקבילה לציר התנועה של האיבר הכבד (ומתוך כך - 90 מעלות לאיבר הכבד). למסלול של האיבר הקל – הנגרר תהיה צורה של מעטפת עקומה רגילה (רגולרית), שאפשר לתאר אותה כגליל או כחלק מגליל. הקצה המרוחק של האיבר הקל משרטט מעגל שהוא מקביל למישור שיוצרת תנועת האיבר הכבד. אף כי מקומו במרחב משתנה כל הזמן, האיבר הקל נשאר במהלך התנועה באותה פוזיציה ביחס לקואורדינטות של המערכת המתווה. זה, והעובדה שפני האיבר משתנים כל הזמן ביחס לציר התנועה, עושה אותו אנלוגי לתנועה רוטציונית. (ציור 14).

3) פוזיצית המוצא של האיבר הקל נמצאת במישור בו נמצא ציר התנועה של האיבר הכבד, אך לא במישור התנועה של האיבר הכבד, ואינה מקבילה לציר התנועה שלו.

האיבר הקל הנגרר משרטט אז מעטפת עקומה (ציור 15). למעטפת זו צורה של חלק מקונוס, הנחתך (במקביל לבסיס) על ידי המישור שנוצר עם תנועת האיבר הכבד. הקצוות המרוחקים של האיברים הקלים מתווים מסלולים מעגליים המקבילים למישורי התנועה של האיברים הכבדים (ציורים 15 ו 16).

ג. באיבר הכבד – תנועה קונית (ציר האיבר ביחס אחר מ-90 מעלות לציר התנועה)

אנו מביאים שלוש דוגמאות בסיסיות של מקרים בהם תנועת האיבר הכבד היא קונית והאיבר הקל מוחזק ביחס קבוע אליו.



ציור 17.

ציור 18.

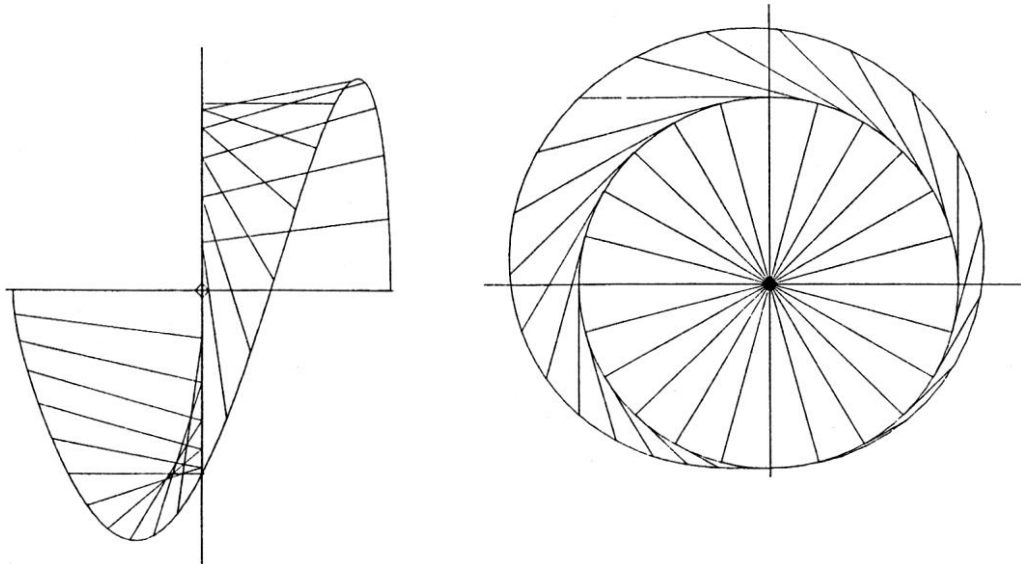
ציור 19.

- 1) הפוזיציה של האיבר הקל היא ביחס של 90 מעלות לציר התנועה: במקרה כזה, המסלול המשרטט על ידי האיבר הקל יהיה מישורי. שינוי הפוזיציה של האיבר הקל יהיה בהתאמה ישירה לשינוי הפוזיציה של האיבר הכבד. לדוגמה: תנועה של 90 מעלות באיבר הכבד תגרום לשינוי (פסיבי) של 90 מעלות בפוזיציה של האיבר הקל (ציור 17).
- 2) הפוזיציה של האיבר הקל מקבילה לציר התנועה: למסלול של האיבר הנגרר יש צורה של מעטפת גלילית. הקצה המרוחק של האיבר מתאר מעגל מקביל לבסיס הקונוס, הנוצר מתנועת האיבר הכבד. למרות שמקומו במרחב משתנה באופן מתמיד, נשאר האיבר הקל במהלך התנועה באותה פוזיציה ביחס. לקואורדינטות של המערכת המתווה (ציור 18).
- 3) פוזיצית המוצא של האיבר הקל נמצאת במישור בו נמצא ציר התנועה של האיבר הכבד, אך איננה מקבילה לו ואיננה ביחס של 90 מעלות אליו. מעטפת עקומה משרטטת אז על ידי האיבר הנגרר. למעטפת זו צורה של קונוס (ציור 19), או של קונוס קטוע. הקצה המרוחק של האיבר הקל מתווה מסלול מעגלי המקביל לבסיס של קונוס זה. מהשוואת שלוש הדוגמאות שהבאנו למעלה, בהן האבר הכבד עושה תנועה קונית ביחד עם תנועה מישורית באבר ה'קל', נראה שאין הבדל מהותי בצורת המסלולים של האבר ה'קל'. הגורם הקובע כאן את צורת המסלול איננו פני המעטפת הנוצרת על ידי תנועת האבר הכבד, כי אם היחס בין ציר האורך של האבר הקל לציר האורך של האבר הכבד.

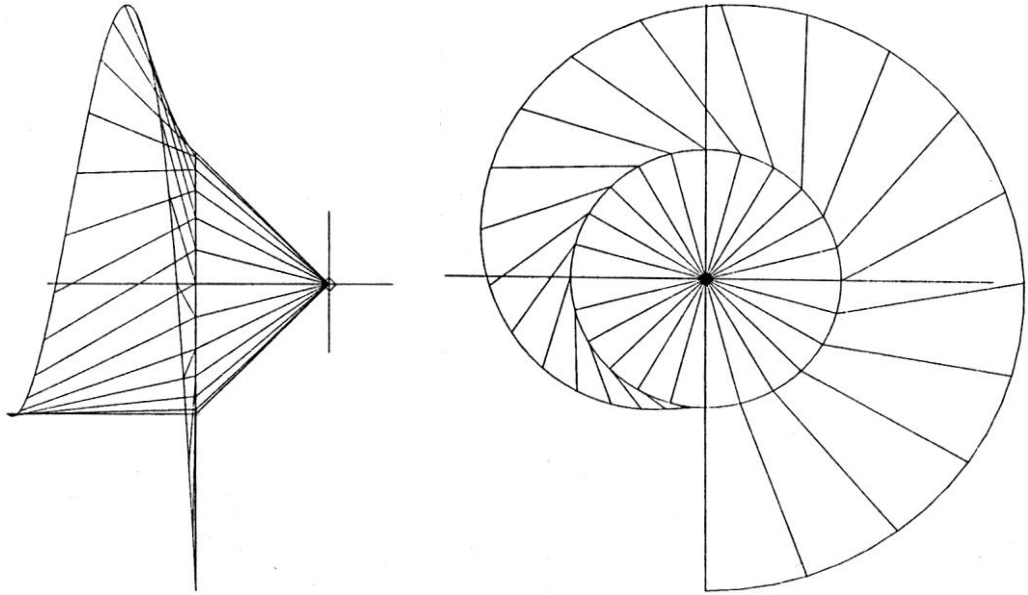
ד. באיבר הכבד – תנועה מישורית או קונית ביחד עם תנועה רוטציונית

כנגזר מן ההגדרה של סוג התנועה, לא ניתן לבצע תנועה קונית ותנועה מישורית על ידי איבר באותו הזמן. יחד עם זאת, אפשר לבצע גם תנועה מישורית וגם תנועה קונית ביחד עם תנועה רוטציונית, מכיון שאיבר מסוגל לנוע סביב הציר של עצמו ובאותו הזמן לנוע גם סביב ציר הנמצא מחוץ אליו. למרות המורכבות הניכרת של צירוף תנועותי זה, הוא ללא ספק מפעולות הגוף האנושי המתרחשות באופן קבוע וטבעי לו יותר מאשר מישורים או קונוסים טהורים.

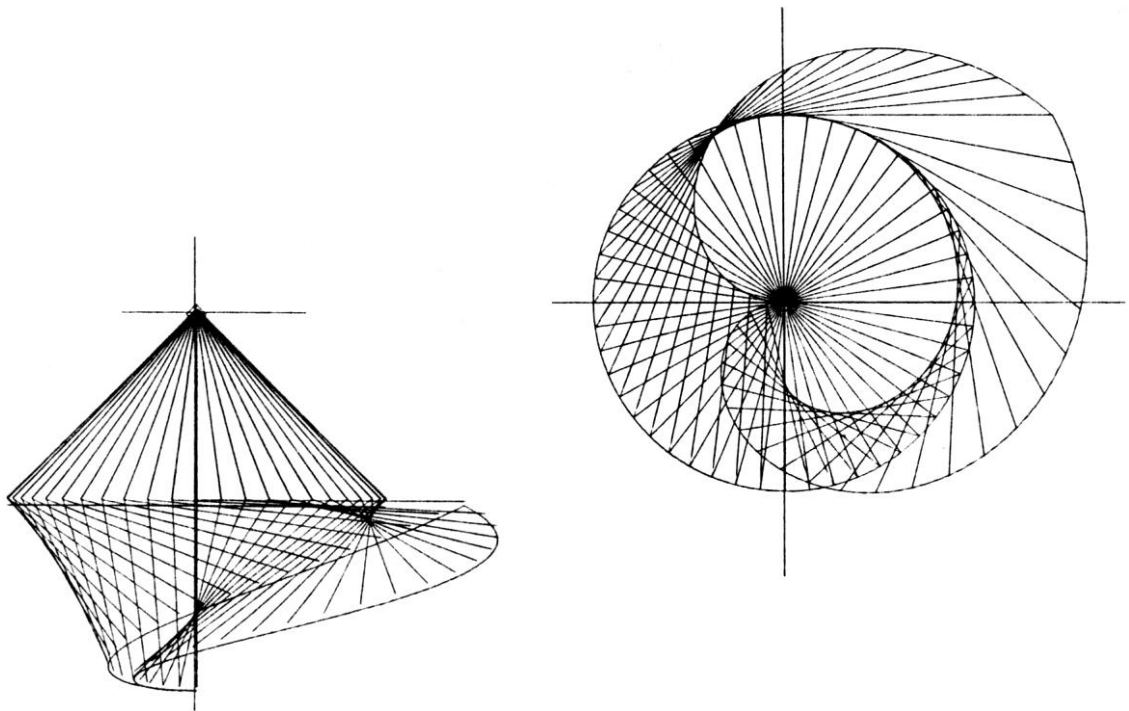
בחלק האחרון של מאמר זה, נראה דוגמאות בהן האיבר הקל נשאר בזווית קבועה לאיבר הכבד, אשר עושה תנועה קונית או תנועה מישורית. אולם, היות שבדוגמאות אלה האיבר הכבד עושה גם רוטציה - האיבר הקל אינו מייצר מסלולים מעגליים או מעטפות עקומות פשוטות מבחינה טופולוגית. מכיוון שלא ניתן לכנות את האחרונים קונוסים, גלילים וכיוצא באלה, עולה הצורך במינוח אחר, אך זה אינו נושא למאמר מבוא זה.



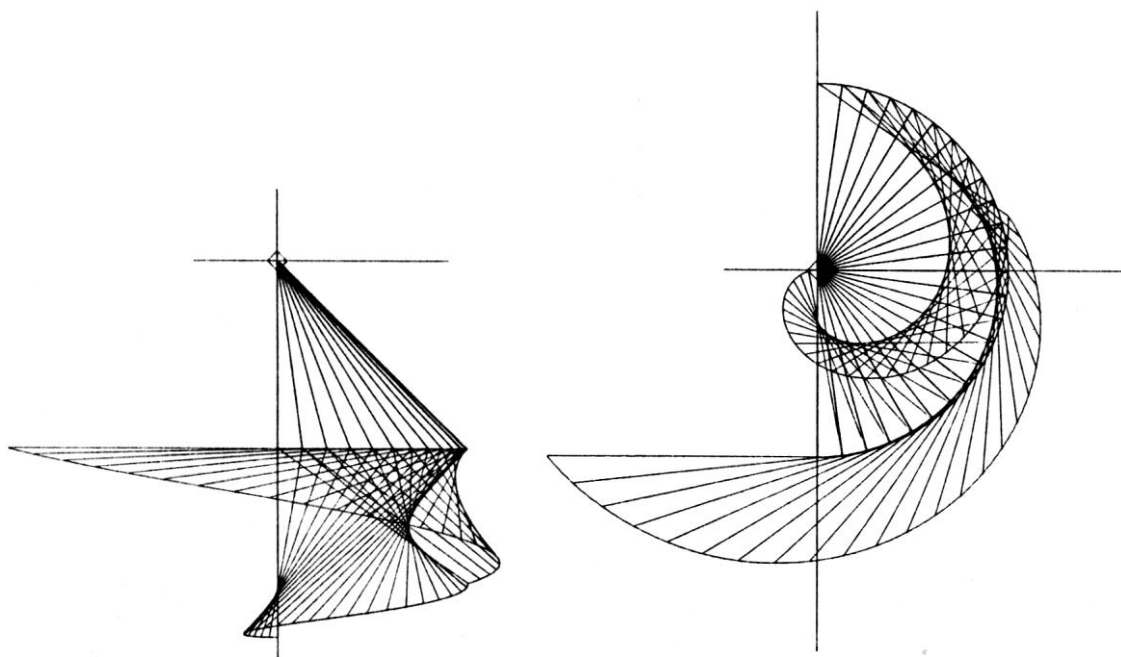
ציור 20א. שני ההיטלים מתארים מסלול זהה של שני איברים נעים. האיבר הכבד נע במישור ובאותו הזמן עושה רוטציה של 180 מעלות. האיבר הקל מוחזק בזווית של 90 מעלות ביחס לאיבר הכבד.



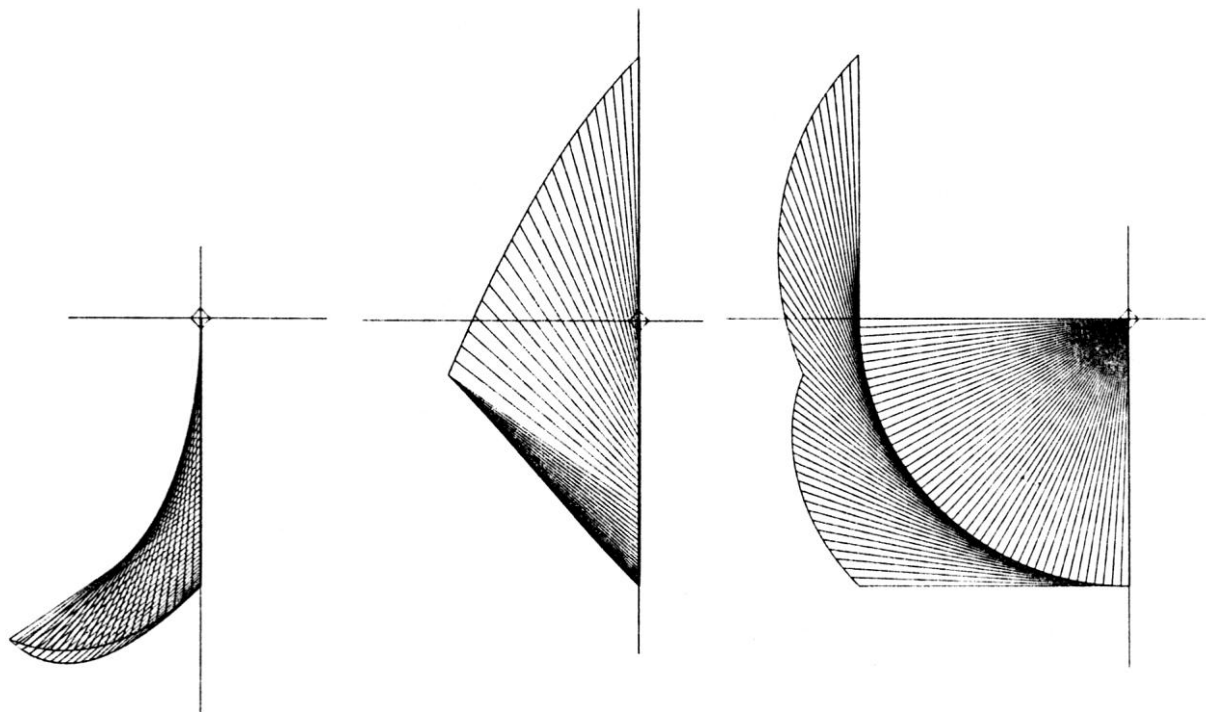
ציור 20. שני ההיטלים מתארים מסלול קוני של האיבר הכבד ביחד עם רוטציה של 180 מעלות, בזמן שהאיבר הקל נמצא בזווית של 45 מעלות ביחס לציר האיבר הכבד.



ציור 21. שני ההיטלים מראים מסלול קוני של האיבר הכבד. באותו הזמן הוא עושה רוטציה של 90 מעלות ואחריה רוטציה של 45 מעלות לכיוון ההפוך. הזווית בין שני האיברים היא 90 מעלות.



ציור 21. שני ההיטלים מתארים את המסלול של איבר כבד המבצע תנועה קונית בת 180 מעלות ולאחריה – תנועה קונית בת 180 מעלות לכיוון ההפוך. באותו הזמן מתרחשת תנועה רוטציונית של 90 מעלות לכיוון אחד. האיבר הקל נמצא בזווית של 90 מעלות לאיבר הכבד.



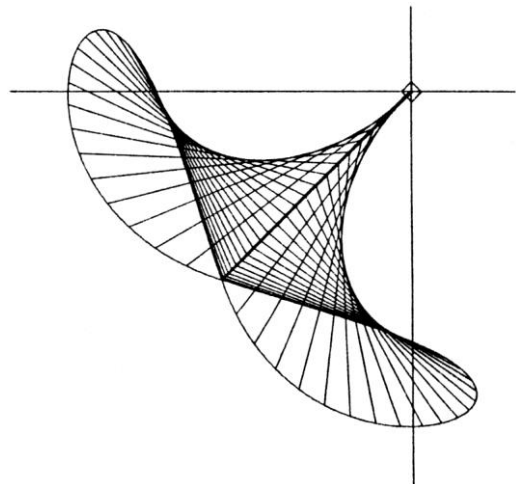
ציור 22. שלושה היטלים (במישורים ביחס של 90 מעלות האחד היחס לשני) של מסלול תנועה של איבר כבד הנע במישור ובו בזמן עושה רוטציה של 45 מעלות לכיוון אחד ואחר כך 45 מעלות לכיוון ההפוך. באותו הזמן מוחזק האיבר הקל ביחס של 90 מעלות ביחס לאיבר הכבד. זה קרוב למציאות הפיסית של גוף האדם כי האינטרוולים סבירים לאיברים סמוכים רבים, כמו, לדוגמא, הזרוע והאמה.

סיכום

הבאנו מבוא למחקר תנועות המייצרות עקומות ומעטפות בלתי מוכרות. עלינו לשאול אילו השלכות מעשיות יכולות להיות למחקר כזה, מעבר לעניין האסתטי עצמו. יכול להיות לו שימוש בתחום הרובוטיקה, שעכשיו כל כך באופנה, אך ערכו המיידני ביותר הוא בתרומתו למודעות הויזואלית של טבע התנועה ובשיפור ההבנה של אופני תנועה בלתי מוכרים.

הצרכים הפסיכו-פיסיים אשר כתב התנועה מנסה לקדם, כרוכים בניתוח חוזר ונישנה של תנועת הגוף, איבר ועוד איבר. בהשוואה להתנהגות המוטורית של היצור האנושי בחיי היום יום תהליך זה עשוי להיראות מסורבל. התפתחות הביצועים המוטוריים נוטה, בדרך כלל, לכיוון מצב בו ניתוח תנועת האיברים איננו תודעתי אלא במידה המאפשרת מיומנות זריזה, שוטפת וללא מחשבה של תנועה תכליתית, והמשרתת בצורה הטובה ביותר גם את דרישות השגרה וגם דרישות אמנותיות. פרוק התנועה למרכיבים אשר ניתן לראות באמצעותם מה עושה כל חלק בגוף יש בו, איפה, משום מהפיכה. רק מבוגר יכול לעשות זאת, מתוך בחירה.

מאמר זה מהווה נסיון ללכוד את היסוד החמקני בתנועה. הדוגמאות הינן דגמים (מודלים) אידיאליים. הן אינן מייצגות שום דבר "ממשי" שאפשר לראות אותו. אף על פי כן, הן מתקיימות כסוגים של צירופים אפשריים בתנועת הגוף האנושי. הן עשויות להיראות קשורות בצורה עקיפה בלבד עם משהו שקורה בחיים הממשיים, אך הן ללא ספק המחשה של מחשבה ברת מימוש בהתפרשן על ידי הגוף הנע. מוצעת כאן אפשרות של כתב-על, מבוסס על החומר המפורט, הכלול בכתב התנועה הבסיסי.



ציור 23. מבט שונה על הפלט שהוצג בציור 1: הוא מראה את האיבר הכבד נע 90 מעלות הלוך וחוזר במישור אנכי. האיבר הקל עושה בינתיים רוטציה של 360 מעלות. הזווית בין שני האיברים היא 90 מעלות.