

---

כיוון התפתחות חדש: בקרה / New trends in motor control: The dynamic approach /  
מוטורית — הגישה הדינאמית

Author(s): צילי רז-ליברמן, דריו ליברמן, T. Raz-Liebermann and D. Liebermann

Source: *Movement: Journal of Physical Education & Sport Sciences* / כתב-עת:  
1991, ספטמבר, / למדעי החינוך הגופני והספורט, תשרי, תשנ"ב / Vol. א&lrn;, No. 2 (1991, ספטמבר, / תשרי, תשנ"ב), pp. 52-70

Published by: Academic College at Wingate

Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/23631921>

---

JSTOR is a not-for-profit service that helps scholars, researchers, and students discover, use, and build upon a wide range of content in a trusted digital archive. We use information technology and tools to increase productivity and facilitate new forms of scholarship. For more information about JSTOR, please contact [support@jstor.org](mailto:support@jstor.org).

Your use of the JSTOR archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use, available at <https://about.jstor.org/terms>



JSTOR

is collaborating with JSTOR to digitize, preserve and extend access to *Movement: Journal of Physical Education & Sport Sciences* / כתב-עת: למדעי החינוך הגופני והספורט

---

## כיוון התפתחות חדש: בקרה מוטורית – הגישה הדינאמית

צילי רז-ליברמן, דריו ליברמן

עד לעת האחרונה שלטה הגישה הקוגניטיבית כאמצעי לניתוח התנהגות מוטורית. כיוון התפתחות חדש בתחום זה הינו הגישה הדינאמית. המטרה העיקרית של מאמר זה הינה להציג את כיוון ההתפתחות החדש של נושא הבקרה המוטורית ולחדד את ההבדלים שבין שתי הגישות. מכיוון שהבקרה המוטורית היא תחום מדעי חדש יחסית, ההולך והמתגבש רק בעשרים השנים האחרונות, מטפל חלקו הראשון של המאמר גם בהתהוות התחום כנושא מחקר עצמאי. במהלך הדיון, נעשה ניסיון לפשט את הנושאים הנידונים בעזרת איורים מקוריים, המדגימים את הרעיונות העיקריים המובאים בטקסט.

### הבקרה המוטורית – תחום מדעי חדש

כבר בסוף המאה ה-19 (לדוגמה בסל, 1820 בתוך וולפורד 1968) היוותה התנהגות מוטורית נושא למחקר. ואולם, ברוב המקרים, לא היתה המוטוריקה המטרה העיקרית של המחקרים, אלא שימשה כאמצעי להבנת נושאים אחרים. זאת אולי הסיבה העיקרית לתופעה המפתיעה, שחסר עדיין הידע הבסיסי על המתרחש בגוף האדם בשעת פעולה מוטורית פשוטה. תחום הבקרה המוטורית מנסה לענות על השאלה, כיצד מתהווה התנהגות מוטורית, ומה מתרחש בגוף האדם בזמן ביצוע תנועה. הדבר נעשה על-ידי שילוב של גישות וידע מן המדעים המדויקים, ממדעי ההתנהגות וממדעי הטבע. פסיכולוגיה היא אחד מתחומי המדע, שתרמו לידע המתפתח היום בבקרה המוטורית. עוד לפני התפתחות הבקרה המוטורית, התעניינו פסיכולוגים רבים בלמידה ובתהליכה, ולכן כללו מחקריהם גם היבטים שונים של למידת מיומנויות מוטוריות (לדוגמה: תורנדייק, 1914). גם הנוירופיסיולוגים, (לדוגמה: שרינגטון, 1906) חקרו תנועה באופן עקיף, כאשר בחנו תהליכים המתרחשים בתא בעת ביצוע מוטורי, כדוגמת הולכה של פוטנציאל פעולה, הבנת

---

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

מנגנונים רפלקסיביים, הבנת פעילות של יחידות מוטוריות ועוד. הפסיכולוגיה והניורופיסיולוגיה היו התחומים העיקריים, שהשפיעו על הבקרה המוטורית בתחילת דרכה (שמידט, 1988). אולם, כל עוד התפתחו הפסיכולוגיה והניורופיסיולוגיה ושאר תחומי המדע, בצורה נפרדת ומקבילה, לא הביאו תוצאות מחקריות להבנה של נושא התנועה. זאת היתה הסיבה העיקרית להתפתחות נושא מחקרי חדש, המתעניין בהתנהגות מוטורית, כתחום אינטגרטיבי (Inter Disciplinary Subject) של מספר דיסציפלינות קיימות. כלומר, רק כאשר התקרבו הדיסציפלינות השונות זו לזו בגלל תחומי התעניינות חופפים, נוצר התחום המדעי החדש, שכונה בתחילה **התנהגות מוטורית** (Motor Behaviour). בשנות ה-70, בעקבות השפעת הגישה הקוגניטיבית בפסיכולוגיה, נטו החוקרים, שעסקו בהתנהגות מוטורית, לנתח את תהליכי ההתארגנות המוטורית, המתרחשים לפני התחלת התגובה, כפועל יוצא של עיבוד המידע המתבצע בתוך המוח. רקע זה הביא לפיתוח תיאורית **עיבוד המידע** שתוסבר להלן. בתחילת שנות ה-80, נוכח ההשפעה הגוברת של ידע מתחומי המדעים המדויקים, חל שינוי משמעותי בבקרה המוטורית, כאשר לצד הגישה הקוגניטיבית הקיימת והמקובלת גם היום, התפתחה גישה נוספת, שתומכת מאמינים, כי ההתארגנות המוטורית כרוכה לא רק בתהליכים הכרטיים, אלא גם בגורמים אחרים, בעיקר כאלו הקשורים במבצע ובסביבתו, ובקשר שביניהם. כיוון חדש זה הביא גם לכינוי בקרה מוטורית, המתאים יותר לגישות החדשות בחקר התנועה.

מטרתה העיקרית של הבקרה המוטורית היא להגיע לתיאוריה כוללת, שתסביר כיצד נוצרת תנועה? כלומר, כיצד מתארגנות המערכות השונות לתגובות מוטוריות, ואיך מתאפשרת קואורדינציה בין מספר כה רב של גורמים עצמאיים במערכת? כדי לגלות את חוקי ההתארגנות בין הגורמים העצמאיים, או **דרגות החופש**, כפי שנקרא להם, משתמש החוקר בתחום הבקרה המוטורית בידע, שפותח בדיסציפלינות אחרות. בעיקר בידע מתחום המתמטיקה היישומית, המשמש ליצירת מודלים של תנועה, בידע מתחום הפיסיקה, העוזר בנייתו ובהבנת המערכת התנועתית על-פי חוקי הפיסיקה (קלאסיים וטרמודינאמיים), או בידע ממדעי המחשב המשמש לביצוע סימולאציות של תנועה או בתכנון והרכבה של רובוטים. בנוסף לדיסציפלינות של המדעים המדויקים קיימת גם חפיפה בנושאי התעניינות גם עם דיסציפלינות ממדעי החיים, כמו ביולוגיה, נוירופיסיולוגיה ופסיכופיסיולוגיה, ועם דיסציפלינות ממדעי ההתנהגות ובעיקר הפסיכולוגיה.

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

מן הראוי להסביר את הקשר שבין בקרה מוטורית לבין למידה מוטורית. מכיוון שיש הרואים בבקרה מוטורית חלק מהדיסציפלינה, המכונה למידה מוטורית. מבחינה כרונולוגית קדם המחקר בתחום הלמידה המוטורית, כענף ייחודי של פסיכולוגית הלמידה בשנות ה-40, למחקר בתחום הבקרה המוטורית, אולם הבקרה המוטורית הינה תחום רחב יותר, הכולל בתוכו את האלמנטים של הלמידה המוטורית. הבקרה המוטורית מנסה לבנות תיאוריות להסברת תנועה על מרכיביה השונים, ומתעניינת בהכרח בכל המגוון הרחב של ביצועים מוטוריים, ואילו הלמידה המוטורית מתרכזת בתחום צר יותר, הכולל רק את ההיבטים השונים של למידת מיומנויות מוטוריות. מכאן גם הקשר החזק והדו-כיווני שבין שתי הדיסציפלינות. מתוך התיאוריות המתפתחות בבקרה המוטורית בודקים חוקרי הלמידה המוטורית את האספקטים השונים, הקשורים ללמידה של מיומנויות מוטוריות. בד בבד מנסים חוקרי הבקרה המוטורית לכלול בתיאוריות תופעות הקשורות לתהליכי למידה, ולהסבירן.

## גישות עיקריות בבקרה המוטורית

כיום מבחינים בבקרה המוטורית בשתי גישות עיקריות. האחת, **הגישה הקוגניטיבית**, הנותנת משקל רב להסברים הכוללים גורמים הכרטיים. השנייה, **הגישה הדינאמית**, המסבירה את ההתארגנות המוטורית באמצעות מושגים וחוקים פיסיקאליים, ללא התערבות הכרחית של תהליכי עיבוד מידע.

### הגישה הקוגניטיבית

התיאוריה הנפוצה יותר בבקרה מוטורית כיום, היא תיאורית **עיבוד המידע** (Theory of Information Processing), שהציע וולפורד ב-1968. התיאוריה הושפעה מצד אחד מהתפתחות הגישה הקוגניטיבית בפסיכולוגיה ומצד שני ממדע הקיברנטיקה, שהביא לפיתוח הרעיון שהאדם יכול להיות מושווה למכונה או למחשב. במלים אחרות, קיים דמיון בין צורות הפעולה של המכונה ושל האדם. לכן אפשר אולי ללמוד על תהליכים, המתרחשים בגוף החי, על-ידי התבוננות בתהליכים המתקיימים בתוך מכונות מורכבות, כמו המחשב הדיגיטאלי. הרעיון העיקרי שמאחורי תיאורית עיבוד המידע הוא שהתנהגות מוטורית היא תוצאה של תהליכים קוגניטיביים, המתרחשים בתוך **הקופסה השחורה**, קרי, מערכת העצבים המרכזית. על-פי הגישה הקוגניטיבית ניתן להשפיע על תהליכים אלו למטרות שונות, כגון

לצורך שיפור תהליך הוראה. באופן זה שוללת גישה זאת את תפיסתה של הגישה ההתנהגותית, שראתה בתהליכי עיבוד המידע, **קופסה שחורה** שאין להתייחס אליה. תהליכים קוגניטיביים אלו יכולים להתחלק לשלבים שונים. חלוקה אפשרית (תיתכנה חלוקות אחרות) של התהליכים הקודמים לביצוע תנועה, מוצגים באיור 1 (מבוסס על שטינברג, 1969).



איור 1:

חלוקה לשלבים של התהליכים הקוגניטיביים הקודמים לפעילות מוטורית על-פי הגישה הקוגניטיבית

הדגש בתיאורית עיבוד המידע הוא על התהליכים הקודמים לתנועה ולא על התנועה עצמה. מחקרים, שבוצעו במסגרת תיאורית עיבוד המידע, עסקו בעיקר בשאלות כמו, קיבולת הקשב (פוסנר וקיל, 1969), תהליך הקידוד של זיכרון מוטורי קצר טווח (פוסנר וקוניק, 1966), או פיתוח רעיון התוכנית המוטורית (קיל, 1968). תחום ההתפתחות הצעיר נתקל בבעייתיות מסויימת כבר בשלבי הראשוניים, מכיוון שהיה עליו למצוא דרכים עקיפות כדי לחקור את התהליכים הקוגניטיביים, הואיל

והתהליכים הפנימיים המתרחשים בגוף החי, אינם ניתנים לצפייה ישירה. במגמה להתגבר על בעיה זאת, פותחו שיטות עקיפות למדידת התהליכים הקוגניטיביים הקודמים לביצוע התנועה והמתרחשים בתוך הקופסה השחורה, דהיינו, במערכת העצבים המרכזית. חוקרים, כגון שטינברג (1969) השתמשו בעיקר במניפולציות של מה שנכנס למערכת (הקלט או הגירויים) ומדידת תוצרי התהליכים (הפלט או התגובות). מכיוון שההנחה הבסיסית ביותר של תיאורית עיבוד המידע היא שכל התהליכים המנטאליים נמשכים זמן מוגבל, המוגדר כזמן תגובה, עסקו מרבית המחקרים בהשפעות של משתנים שונים על זמן התגובה. לדוגמה, ההשפעה של סוגי גירויים שונים (צ'רניקוף וטילור, 1952), ההשפעה של מספר הגירויים והתגובות (היק, 1952), או ההשפעה של מורכבות התגובה (הנרי ורוג'רס, 1960; קלאפ, 1980).

**מודל החוג הסגור.** במסגרת תיאורית עיבוד המידע פותחו מספר מודלים, אשר יכולים לשמש גם להבנת למידה של מיומנויות מוטוריות. המודל הראשון, שהוצג בידי אדמס (1971) נקרא **החוג הסגור**, ובמרכזו מושגים, כגון: **משוב תיקון שגיאות** על-ידי "מנגנון סרב" (Servo-Mechanism), והירארכיה ארגונית. החוג הסגור מציע, שתנועות מבוצעות ומבוקרות בעזרת מנגנון המקיים לאורך כל זמן הביצוע השוואה בין התנועה הרצויה והתנועה המבוצעת, ומבצע תיקון בעת הצורך. המשוב עשוי להיות פנימי ומבוסס על חיישנים פרופריוספטיים, הנמצאים בתוך מערכת התנועה, ואחראים על התחושות שלנו באשר לאורך השריר, לזווית המפרק וכד'. המשוב עשוי להיות חיצוני, המתקבל בדרך כלל דרך מערכות הראייה או השמיעה. מודל זה היה הראשון, שנלמד בידי חוקר תנועה ולא בידי חוקר פסיכולוג, והוא מייצג למעשה את תחילת היפרדותו של נושא הבקרה המוטורית מן הפסיכולוגיה. המחקרים, שתוצאותיהם תמכו במודל החוג הסגור, עסקו בעיקר בחשיבותו ובחיוניותו של המשוב לביצוע מוטורי (לדוגמה, קלסו, סטלמך ווונמקר, 1973) ובלמידה של מיומנויות מוטוריות חדשות (לדוגמה, טרוברידג' וקסון, 1932).

**מודל החוג הפתוח.** אולם מודל החוג הסגור לא הצליח להתאים לכל סוגי התהליכים התנועתיים ולהסביר את כל הממצאים המחקריים. עדיין נשארו שאלות פתוחות, כמו, כיצד יכולה תנועה להיווצר בזמן קצר יותר מזמן תגובה מינימאלי? או, כיצד הצליחו קופים, שעצביהם האפרנטיים נותקו (דבר, שמונע מהם קבלת משוב תחושת) לבצע תנועות רצוניות? עקב שאלות כגון אלה, פותח מודל חדש, **מודל החוג הפתוח**, שהתבסס על אנאלוגיות ממדעי המחשב. ואכן, בתחילת שנות ה-80, התפתחו מדעי

המחשב והקיברנטיקה בצורה משמעותית והשפיעו בין היתר גם על הבקרה המוטורית. במרכזו של המודל נמצא מושג **התוכנית המוטורית** (אנאלוגי לתוכנית מחשב), לפיו, ביצוע תנועות אפשרי על ידי הוצאה לפועל של תוכנית מוטורית ספציפית הקיימת ומאוחסנת בראש כחידה קוגניטיבית. חיזוק לרעיון זה נמצא בתחום הנורופיסיולוגיה, שבו הצליחו חוקרים לבדוד מספר **מחוללי דפוס עצביים** (Neural Pattern Generators), האחראים לביצוע תנועות שונות באופן עצמאי, והמקבילים במהותם לתוכניות מוטוריות. לדוגמה, גרילנר (1985) הראה, כי הליכה אפשרית גם בתנאים, שבהם נותקה מערכת העצבים המרכזית, דבר שמנע קבלת משוב כלשהו. את מרבית המחקרים, שחיזקו את רעיון התוכנית המוטורית ניתן לחלק לשלוש קטגוריות: (1) מחקרים, שהראו, שאפשר **להגיב או לשנות תגובה בזמן קצר יותר מזמן תגובה**, לדוגמה, נגינה על פסנתר (לשלי, 1951); (2) מחקרים, שהראו, שניתן **לבצע תנועות גם בהיעדר משוב** (טאוב, 1976; טאוב וברמן, 1968; סמיט, 1969); (3) מחקרים, שהראו, **שאי-אפשר לעצור תנועה אף על פי שעדיין לא החלה**. תופעה, המזכירה תוכנית מחשב: בו ברגע שהתוכנית החלה אי-אפשר לעצור או לשנות אותה (סלטר-המל, 1960; הנרי והריסון, 1961). מודל התוכנית המוטורית פתר אמנם את הבעיות, שהתעוררו עם מודל החוג הסגור, אולם הוא עורר מספר בעיות חדשות, ביניהן, בעיית האיחסון בזיכרון של כמעט אין סוף תוכניות מוטוריות, או הבעיה של ביצוע תנועה חדשה, כאשר עדיין לא קיימת עבורה תוכנית מוטורית ספציפית.

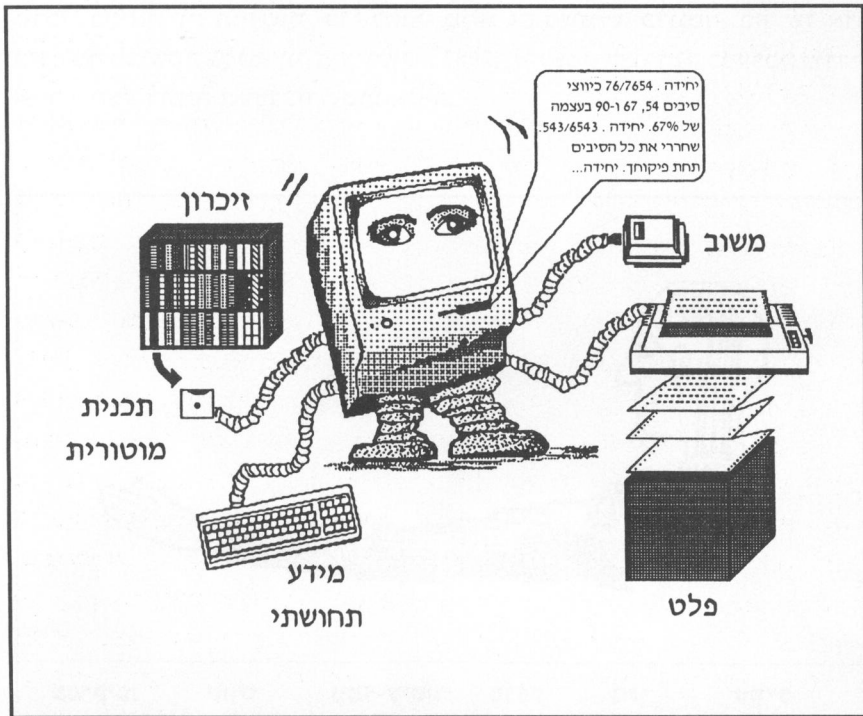
**מודל התוכנית המוטורית הכללית.** הצורך לפתור את בעיית האיחסון בזיכרון הביא בהמשך לפיתוח רעיון **התוכנית המוטורית הכללית**. לפי מודל זה, נשמרים בזיכרון לאחר אימון ותירגול רק האלמנטים היחסיים של התנועה, כמו הזמן היחסי של חלקי התנועה השונים. אלמנטים יחסיים אלו, המוכרים בשם **בלתי-משתנים** (Invariants), אינם משתנים לאורך מגוון רחב של ביצועים, למרות שינויים, החלים באלמנטים המוחלטים של אותה תנועה, כמו: זמן התנועה הכללי. כלומר, האומדנים המשתנים, אותם אומדנים מוחלטים המשתנים מתנועה לתנועה, אינם נשמרים בזיכרון. כדי שתוכנית תצא לפועל, כלומר, כדי לבצע תנועה כלשהי, יש צורך בהזנת התוכנית בתנוני האומדנים המשתנים. על סמך נתונים אלו מחשבת התוכנית המוטורית הכללית את דפוסי התנועה הספציפית. האומדנים הבלתי משתנים עשויים להתאים למספר רב של תנועות בעלות אלמנטים משתנים שונים. פעולה בדרך זו, מקטינה בצורה משמעותית את כמות המידע, שאותו יש לאחסן בזיכרון.

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

בדרך זאת מציעה התוכנית המוטורית הכללית פתרון לבעיית האיחסון בזיכרון. דוגמה לתוכנית מוטורית כללית ניתן לראות בכתב יד. בשעת כתיבה ניתן לשנות את גודל האות מבלי לפגוע בצורתה הכללית, כלומר, הגודל היחסי של כל חלק וחלק באות נשמר (אומדן בלתי משתנה). ואילו הגודל הכללי של האות משתנה (אומדן משתנה). מכאן, התוכנית המוטורית הכללית כוללת את הגודל היחסי של חלקי האות השונים, ועל-ידי כך את דפוסה העיקרי. על ידי הוספת נתון הגודל הכללי של האות, מסוגלת התוכנית לחשב את הגודל האמיתי של כל חלק וחלק ולהוציא לפועל אות בכל גודל שהוא (הולרברך, 1978). חוקרים אחרים זיהו את האומדנים הבלתי משתנים והמשתנים גם בפעולות אחרות, כמו הליכה (שפירו, זרניק גרגור ודיסטל, 1981), הדפסה במכונת כתיבה (טרזולו ווייאני, 1979) או תנועת יד (שפירו, 1977), 1978). בשלב מתקדם יותר פיתח שמידט (1975) את רעיון ה**הסכימה המוטורית**. המודל מציע, שבתהליך הלימוד של מיומנויות מוטוריות נוצרים ונשמרים בזיכרון **כללים** של התנועה הנלמדת. הכללים הללו מכילים את ה**תנאים הראשוניים**, שבהם בוצעה התנועה, את ה**רצף החושי** במהלך התנועה, את **משתני התנועה** ואת **תוצאותיה**. ארבעה מרכיבים אלו נקשרים יחד ב"נוסחאות" או ב"כללים", דבר, שמקטין את כמות המידע הנשמר, ופותר את בעיית האיחסון. המודל ממליץ להוסיף לתהליך ההוראה גיוון באימון, שיאפשר יצירת סכימות רחבות, אשר יתאימו לביצוע מיומנויות במגוון רחב של תנאים. כיום מודל הסכימה המוטורית שהוא שילוב של החוג הסגור ושל החוג הפתוח, הוא המודל, המקובל ביותר להסברת התנהגות מוטורית. המודל מציע, שתנועות איטיות מוסברות בעזרת החוג הסגור לפיו המערכת זקוקה למשוב כדי לתקן שגיאות במקרה שנתגלו, ואילו תנועות מהירות מוסברות בעזרת החוג הפתוח, הכולל שימוש בתוכנית מוטורית או סכימה.

**הבעייתיות של הגישה הקוגניטיבית.** המשותף לכל המודלים שהוזכרו לעיל היא העובדה, שכולם מציעים הירארכיה של מנגנוני תנועה. כלומר, שליטה ישירה של מרכזים עליונים על מרכזים נמוכים יותר. איור 2 מדגים בצורה פשטנית את הבעייתיות שמעוררת גישה המציעה שליטה ישירה של מרכזים עליונים על מרכזים תחתונים, והמשתמשת במטאפורה של אדם=מחשב.





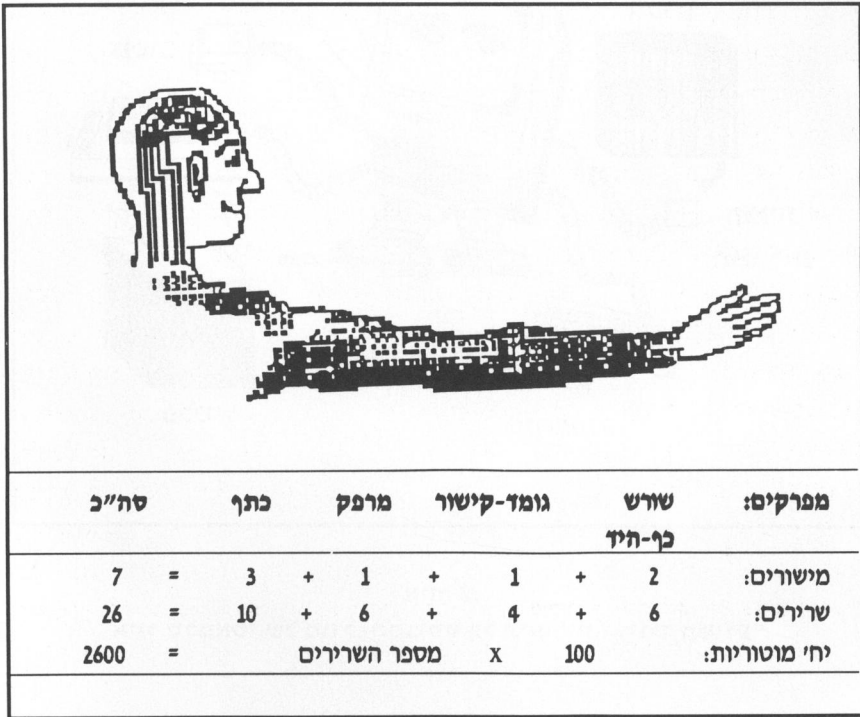
איור 2:

איור סכמטי של מודל, המבוסס על תיאורית "עיבוד המידע"

הספיקות הראשונים לגבי הגישה הקוגניטיבית החלו עם התרגום לאנגלית של עבודת החוקר הסובייטי ברנשטיין ב-1967 (שנכתבה במקור ב-1947). אף על פי שהיתה קיימת בין החוקרים אי-שביעות רצון מן המודלים של החוג הסגור ושל החוג הפתוח, היה ברנשטיין הראשון, שהציע, כי ייתכן, שקיימת דרך אלטרנטיבית לתיאור תהליכי התנהגות מוטורית. הוא גם היה הראשון, שזיהה שתי בעיות מרכזיות בגישה הקוגניטיבית, והציג אותן במאמרו. הבעיה הראשונה, שעליה דיבר נקראת **בעיית דרגות החופש**, והיא מתייחסת לעובדה, שמספר היחידות הנתון לשליטה בידי המרכזים העליוניים בעת ביצוע תנועה, הוא עצום. לדבריו קיימת בעיה מסויימת עם תיאוריה, המציעה שליטה ישירה על כל יחידות התנועה. דרגות החופש הינו מושג

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

מרכזי בתיאוריות החדשות. כדי להבין מושג זה נשתמש, כדוגמה, ביד של אדם (הדוגמה מבוססת על טורווי, פיצ'י וטולר, 1982), שתשמש לצורך זה כמערכת בודדת. איור 3 מציג דוגמה זאת בצורה סכמאטית.



**איור 3:**

**דרגות החופש ברמות השונות, כפי שמודגם על יד של אדם**

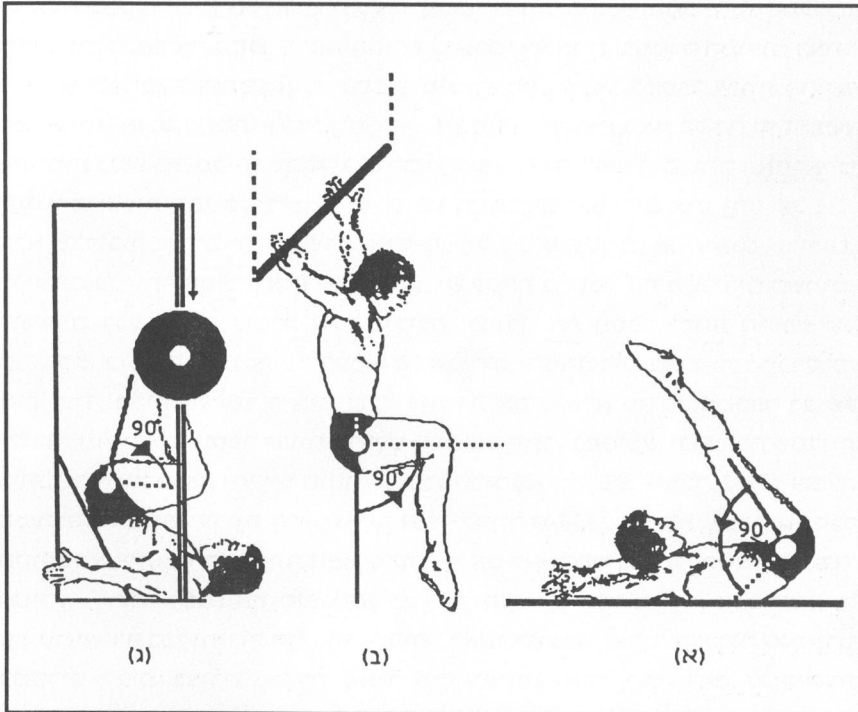
ביד אפשר לזהות ארבעה מפרקים עיקריים: כתף, מרפק, גומד-קישור ושורש כף היד. כל מפרק בודד יכול לנוע במספר מישורי תנועה. מפרק חד-צירי (כמו למשל המרפק) ינוע במישור אחד, ואילו מפרקים אחרים יכולים לנוע בשניים ואף בשלושה מישורים. מספר המישורים, שבהם יכולה להתבצע תנועה בכל אחד מן המפרקים השונים, מייצג את מספר דרגות החופש המכאניות של אותו מפרק, וסכום כל מישורי

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

התנועה בכל המפרקים יחד מייצג את מספר דרגות החופש המכאניות במערכת כולה. כדי לתאר את מספר דרגות החופש במערכת מכאנית (במקרה המודגם באיור 3) היינו יכולים, להסתפק אולי, בסכום מישורי התנועה או במספר דרגות החופש המכאניות. אולם כשמתייחסים לגוף חי, אין מספר זה מייצג את כל דרגות החופש הקיימות במערכת, מכיוון שהשרירים הם המפעילים את המפרקים, והם האחראיים למגוון התנועות הקיים. ידוע, כי היחס בין המפרקים לשרירים אינו יחס של 1:1, אלא שברוב המקרים יותר משריר אחד מפעיל מפרק מסוים, או שישנם שרירים הפועלים על יותר ממפרק אחד. עקב זאת, יש לקחת בחשבון את השרירים השונים, הפועלים בכל מפרק. עובדה זאת מגדילה, כמובן, את מספר דרגות החופש של המערכת. בדוגמה שלנו אפשר לספור 26 שרירים, המחוברים לארבעת המפרקים. זאת ועוד, מכיוון שהשריר אינו עובד כיחידה אחת, אלא מורכב ממספר רב של יחידות מוטוריות, מספר דרגות החופש גדול עוד יותר. בממוצע, ובהערכה שמרנית ביותר, קיימות כ-100 יחידות מוטוריות בכל שריר (טורווי, פיצ'וטולר, 1982). עובדה המעלה את מספר דרגות החופש ביד אחת ליותר מ-2600 יחידות. מובן, שמספר הקומבינאציות, או התוכניות המוטוריות – אם להשתמש במושגי תיאורית עיבוד המידע – הוא כמעט אין-סופי. כאן מתגלה הקושי של התיאוריה, המבוססת על שליטה ישירה בכל יחידות התנועה. במיוחד כאשר ידוע לנו, שתנועה יכולה להתארגן במקרים רבים בצורה מהירה מאוד וספונטאנית. אחד החיזוקים לבעייתיות בשליטה במספר רב של דרגות חופש, מתקבל מתחום הרובוטיקה. ידוע, שעל אף ההתקדמות הרבה בתחום הרובוטיקה עדיין לא נבנה רובוט, אשר מסוגל לבצע תנועה חלקה בשלושת המישורים, והכולל שליטה של יותר ממספר מוגבל של דרגות חופש. כלומר, השליטה על מספר רב של דרגות חופש הוא בעייתי.

הבעיה השנייה, שהועלתה בידי ברנשטיין נקראת **בעיית השונות בתנועה** (Context Conditioned Variability), והיא מתייחסת לעובדה, שגורמים ביומכאניים, אנאטומיים ופיסיולוגיים מגדילים עוד יותר את בעיית השליטה בתנועה. דוגמה לבעיית השונות בתנועה מוצגת באיור 4.

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991



**איור 4:**

**דוגמה לבעיית השונות בתנועה:**

- א. כפיפה מהירה בירך ללא הפעלת כוח שרירי.**
- ב. כפיפה בירך באמצעות מאמץ איזוטוני קונצנטרי של כופפי הירך.**
- ג. כפיפה איטית בירך על-ידי מאמץ איזוטוני אקצנטרי של פושטי הירך.**

בכל המצבים המוצגים באיור, התנועה הסופית שבוצעה היתה כפיפה של 90 מעלות במפרק הירך. אולם בגלל עמדות המוצא השונות, ביצעו שרירים שונים את הכפיפה, אגב שימוש בסוגי מאמץ שונים. אם בדרך כלל מבצעים כופפי הירך מאמץ קונצנטרי כדי לבצע כפיפה בירך (כמו חלק ב' של האיור), הרי שבחלק א' הכפיפה מבוצעת ללא מאמץ שרירי כלל (בהנחה, שהתנועה מבוצעת ללא הפעלת כוח שרירי לצורך האטת התנועה). חלק ג' מדגים ביצוע כפיפה בירך בעזרת מאמץ אקצנטרי של פושטי הירך (בהנחה, שהכפיפה נעשית בצורת איטית ומבוקרת). זאת היא דוגמה להשפעה של

עמדות המוצא השונות, המגדילות את מספר התוכניות המוטוריות, הדרושות כדי לייצג תנועה בודדת. אם אחת מהנחות היסוד של הגישה הקוגניטיבית היא שלכל תנועה קיימת תוכנית מוטורית, הרי שלכל עמדת מוצא צריכה להיות תוכנית מוטורית נפרדת, ותפקיד המרכזים העליונים הוא לבחור בתוכנית המתאימה בעת ביצוע הפעולה. מספר התוכניות המוטוריות לאור עובדה זאת הוא איפוא, כמעט אין סופי.

אם כי ברנשטיין לא הציע פתרון לבעיות שהעלה, הרי שעצם השאלות לקהילה המדעית, היוותה נקודת מפנה לשינוי בדרך החשיבה של החוקרים. ספיקותיו של ברנשטיין תרמו בהכרח לפיתוח גישות אלטרנטיביות, כמו הגישה הדינאמית (Dynamic approach).

### הגישה הדינאמית

רעיונותיו של ברנשטיין קיבלו חיזוק גם מתוצאות מחקרים, שנערכו אף הם בברית המועצות, אולם פורסמו בעולם המערבי מאוחר יותר. מחקרים אלה הטילו ספק באחת מהנחות היסוד של הגישה הקוגניטיבית, האומרת, שכדי לבצע תנועה ולהגיע לתנוחה רצויה, יש צורך בשליטה מוחית ובעיבוד מידע קוגניטיבי. המחקרים הראו, כי לפחות תנועות מסויימות ניתן להסביר בעזרת ההנחה כי השריר מתנהג כקפיץ המחזיק מסה, ולוותר על הצורך בעיבוד הקוגניטיבי. מודל זה נקרא מודל **המסה-קפיץ** (אסטרין ופלדמן, 1965), והוא מציע, כי לשריר התנהגות הדומה להתנהגות של קפיץ לינארי. השוואה זאת מבוססת על העובדה, כי גם לשריר וגם לקפיץ תכונות משותפות, כמו היחס בין השינוי במתח והשינוי באורך. היחס בין השינוי במתח לבין השינוי באורך קובע את דרגת **הקשיות** (Stiffness) של הקפיץ. אם נדמיין מספר קפיצים מחוברים למנופים שונים, כמו שרירים המחוברים לזרועות, נראה, כי המנופים יטו להגיע לנקודת איזון, המבוססת על דרגות הקשיות של הקפיצים השונים. כלומר, ניתן לבנות מודל ממשי ולהביא לשינוי בתנוחתו הסופית על-ידי שינוי בקשיות הקפיצים, וללא התערבות של "מוח" מפקח, המכיל ייצוג קבוע מראש של כל מרכיבי התנועה. בגוף החי נקבעת דרגת הקשיות על-ידי רמת העיצוב של השרירים. בהסתמך על מודל זה אפשר להביא את הגפיים לתנוחה סופית מסויימת, דהיינו, לנקודת איזון חדשה, על-ידי שינוי הקשיות של השרירים השונים. חשיבות המודל היא בעובדה, שהוא מציע צמצום גדול במספר דרגות החופש הדורש שליטה. כיוון שקשיות השריר היא תוצאה של היחס בין אורך השריר למתח המופעל עליו, לכן היא תכונה המוטבעת בשריר עצמו. עקב זאת, ניתן להגיע לתנוחה חדשה

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

על-ידי שינוי במתח השריר בלבד, וללא כל צורך בעיבוד מידע של כוח, תזמון בין-שרירי או משוב פריפרי.

מחקרים אלו הטילו ספק בהנחת היסוד של הגישה הקוגניטיבית, והביאו לפיתוח הגישה הדינאמית. הגישה התחילה להתפתח בצפון אמריקה רק בתחילת שנות ה-80, והושפעה בעיקר מספקותיו של ברנשטיין, מרעיונות חדשים, כמו זה של אסטריין ופלדמן (1965), משילוב חוקי טרמודינאמיקה, ומתאורית ה"תפיסה הישירה" של גיבסון (1966) בפסיכולוגיה. הגישה הדינאמית מנסה לקדם הבנת תהליכים תנועתיים על-ידי שימוש ברמת תיאור מופשטת יותר. הדבר בא על חשבון דוגמאות ואנאלוגיות מוחשיות יותר, כמו תוכנית מוטורית, משוב, יחידת בקרה, או פלט, ועל כן מתקשה להפוך לנחלת הכלל. הגישה הדינאמית טוענת, שמערכת השרירים מתנהגת למעשה כסוג של מערכת טרמודינאמית פתוחה. כלומר, מערכת שיש בה תנועה ומעבר של אנרגיה ושל חומר, ולא כמערכת מכאנית בלבד, שבה חוקי ניוטון מכתיבים את צורת ההתנהגות (ג'קה וקלסו, 1989). במסגרת זאת גם האנאלוגיה **אדם=מכונה** או **אדם=מחשב** אינה מדויקת. הגישה מציעה, כי חוקים טרמודינאמיים, ולא רק חוקים מכאניים, פועלים על הגוף החי והם צריכים להילקח בחשבון בבואנו לנסות ולהבין התנהגות מוטורית. קוגלר, קלסו וטורווי (1980) וגם קלסו ואח', (1980) מפרטים בהרחבה את החוקיות הטרמודינאמית. אבל לצורך מאמר זה אפשר להסתפק בהזכרת החוקים העיקריים, הרלוונטים להבנת התנהגות מוטורית. במערכות טרמודינאמיות פתוחות מתקיימת התארגנות ספונטאנית של מבנים דיסיפטיביים, ומצב הרגיעה של המערכת מוגדר כמצב של הומיאוקינטיקס (Homeokinetics - מצב תנועתי דינאמי), הכולל מנוע אוסילטורי (Engine Oscillatory). גישה זאת מהווה שינוי באסטרטגיה המוצעת לחקר קואורדינאציה בתנועה, כשהיא גורסת שכל תנועה היא תוצאה של אינטראקציה בין מספר רב של דרגות חופש, ואין צורך ביחידת בקרה חיצונית ו/או פנימית כדי לשלוט על ביצוע התנועות. גישה זאת מבוססת גם על מושג **המבנה הקואורדינאטיבי** (Structure Coordinative). הנחשב ליחידת הפעולה הבסיסית. המבנה הקואורדינאטיבי הוא למעשה קבוצה של שרירים, אשר פועלת כיחידה תיפקודית אחת לביצוע משימה מוטורית מסויימת (קוגלר, קלסו וטורווי, 1980). תופעה זו, לפיה מספר שרירים מאורגנים ליחידה תיפקודית אחת מביאה להפחתה במספר דרגות החופש. לצורך המחשה ניתן לראות אוסף של מבנים קואורדינאטיביים כמילון תנועות, שבו פעולות השרירים משמשות כאותיות, והמבנים הקואורדינאטיביים משלבים אותן למלים. מספר המלים בשפה

קטן יותר ממספר שילובי האותיות האפשרי, ובהקבלה – מספר התנועות התיפקודיות קטן ממספר צירופי התנועות האפשריות (קלסו ושונו, 1988). ראויה לציון העובדה, כי חוקרי התנועה בתחום הנורופיסיולוגיה (השוה: לי, 1984) הגיעו גם הם למושג המקביל במהותו למושג המבנה הקואורדינאטיבי והוא מכונה – **סינרגיות נירומוטוריות** (Synergies Neuromotor). מושג זה מסביר, כיצד ניתן לצמצם את המספר של דרגות החופש שבשליטת המערכת על ידי חיבור של מספר יחידות נירומוטוריות ליחידה תיפקודית אחת.

מן הראוי להזכיר, כי הגישה הדינאמית הינה גישה חדשה, דבר המסביר אולי את הפער הקיים בין המודלים התיאורטיים והצרכים היישומיים, שהם קרוב לוודאי המשמעותיים ביותר למורה לחינוך גופני ולאנשי ספורט. אולם עם זאת, ישנם היום רבים המאמינים, כי באמצעות גישה שונה זאת, אפשר יהיה בעתיד לענות על מספר שאלות בסיסיות, הקשורות ביכולת לנוע וביכולת ללמוד מיומנויות שונות.

## סיכום

מטרת המאמר הינה להציג כיוון התפתחות חדש בבקרה מוטורית, **הגישה הדינאמית**, המשמשת להבנת תהליכי פיקוח ובקרה של התנהגות מוטורית. הגישה שייכת לתחום מדעי חדש יחסית, המכונה בקרה מוטורית. במאמר הוצגו שתי הגישות העיקריות בבקרה המוטורית. הגישה הקוגניטיבית, היא הגישה המקובלת להבנת התנהגות מוטורית, כלומר, המשתמשת במטאפורה **אדם=מחשב**. הגישה הקוגניטיבית נתמכת בתוצאות מרבית המחקרים, שבוצעו בעשרים השנים האחרונות בבקרה המוטורית ובלמידה המוטורית. הגישה הדינאמית, לעומת זאת, טוענת, שהעובדה, שאפשר לתאר את התנהגות גוף האדם בעזרת הידע, שיש לנו על מחשבים, אינה בהכרח מצדיקה את הטענה, שאנחנו פועלים כמו מחשבים. הגישה מסתמכת גם על מספר בעיות, המתעוררות בגישה הקוגניטיבית, בעיקר בעיית דרגות החופש ובעיית השונות בתנועה. הגישה הדינאמית מציעה דרך חילופית לתיאור התנהגות מוטורית. הגישה מסתמכת על התארגנות תנועה בצורה ספונטאנית בעזרת **מבנים קואורדינאטיביים**. התיאוריות, שפותחו בכל גישה, הדיסציפלינות העיקריות, שהשפיעו על פיתוח הגישות, הרעיונות המרכזיים שלהן, התקופה

"בתנועה", חוברת מס' 2, תשנ"ב-1991

העיקרית בה היו פופולריות, והמודלים ללמידה שנגזרו מתוך הגישה הקוגניטיבית, מוצגים בטבלה 1.

### טבלה 1:

#### סיכום ההבדלים בין שתי הגישות העיקריות המקובלות ב"בקרה המוטורית"

הגישה	קוגניטיבית	דינאמית
התיאוריה	תיאורית עיבוד המידע	תיאורית התנועה
ההשפעות העיקריות	פסיכולוגיה קוגניטיבית קיברנטיקה	טרמודינאמיקה (פיסיקה) פסיכולוגיה ("התפיסה הישירה")
המודלים המסבירים למידה	חוג סגור חוג פתוח תוכנית מוטורית כללית סכימה מוטורית	חסרים עדיין
הרעיונות המרכזיים	(* דגש על תהליכים קוגניטיביים הקודמים לתגובה (* שליטה ישירה של מרכזים עליונים על מרכזים תחתונים).	(* התארגנות ספונטאנית לפי חוקי הטרמודינאמיקה. (* מבנים קואורדינאטיביים.
התקופה	שנות ה-60 עד היום	שנות ה-80 עד היום

הגישה הדינאמית עדיין לא "זכתה" לפיתוח מודלים רלוונטיים ללמידה, אם כי מודלים ייחודיים כאלה הם המעניינים יותר מכל את המורה לחינוך גופני. ניתן לשער כי עם התפתחות המחקר בבקרה המוטורית ואימוץ הגישה הדינאמית יימצאו פתרונות גם לשאלות הקשורות לתהליכי ההוראה-למידה, בתחומי החינוך הגופני והספורט.



## רשימת המקורות

- Adams, J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. **Journal of Motor Behavior**, 3, 111-150.
- Asatryan, D.G. & Feldman, A.G. (1965). Biophysics of complex systems and mathematical models. **Biofizika**, 10 (5), 925-935.
- Bernstein, N. (1967). **The co-ordination and regulation of movements**. Oxford: Pergamon Press.
- Chernikoff, R. & Taylor, F. V. (1952). Reaction time to kinesthetic stimulation resulting from sudden arm displacement. **Journal of Experimental Psychology**, 43, 1-8.
- Gibson, J. J. (1966). **The senses considered as perceptual systems**. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gibson, J. J. (1979). **An ecological approach to visual perception**. Boston: Houghton-Mifflin.
- Grillner, S. (1985). Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. **Science**, 228, 143-149.
- Henry, F. M. & Harrison, J. S. (1961). Refractoriness of a fast movement. **Perceptual and Motor Skills** 13, 351-354.
- Henry, F. M. & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. **Research Quarterly**, 31, 448-458.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. **Quarterly Journal of Experimental Psychology**, 4, 11-26.
- Hollerbach, J. M. (1978) **A study of human motor control through analysis and synthesis of handwriting**. Unpublished doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Mass.

- Jeka, J. & Kelso, J. A. S. (1989). The dynamic pattern approach to coordinated behavior: A tutorial review. In S. A. Wallace (Ed.). **Perspectives on the coordination of movement** (5-45). Amsterdam: North-Holland Pub. Co.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skills motor performance. **Psychological Bulletin**, *70*, 387-403.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Kugler, P. N. & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structure as dissipative structure: II. Empirical lines of convergency. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), **Tutorials in motor behavior**. Amsterdam: North-Holland.
- Kelso, J. A. S. & Schoner, G. (1988). Self-organization of coordinated movement patterns. **Human Movement Science**, *7*, 27-46.
- Kelso, J. A. S., Stelmach, G. E. & Wannamaker, W. E. (1973). The continuing saga of the nerve compression block technique. **Journal of Motor Behavior**, *8*, 155-160.
- Klapp, S. P. (1980). The memory drum theory after twenty years: Comments on Henry's note. **Journal of Motor Behavior**, *12*, 169-171.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S. & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structure as dissipative structure: I. Theoretical line. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), **Tutorials in Motor Behavior**. Amsterdam: North-Holland.
- Lachley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In: L. A. Jefferss (Ed.). **Cerebral mechanisms in behavior: The hixon symposium**. New-York: Wiley.
- Lee, W. A. (1984). Neuromotor synergies as a basis for coordinated intentional action. **Journal of Motor Behavior**, *16* (2) 135-170.

- Posner, M. I. & Konick, A. E. (1966), On role of interference in short-term retention. *Journal of Experimental Psychology*, **72**, 221-231.
- Posner, M. I. & Keele, S. W. (1969). Attentional demands of movement. *Proceedings of the 16th Congress of Applied Psychology*. Amsterdam: Swets & Zeittinger.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82**, 225-260.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning. A behavioral emphasis*. Champaign, Illinois: Human Kinetics Publishers.
- Shapiro, D. C. (1977). A preliminary attempt to determine the duration of a motor program. In: D. M. Landers & R. W. Christina (Eds.). *Psychology of motor behavior and sport* (Vol. 1). Urbana, Il: Human Kinetics Publishers.
- Shapiro, D. C. (1978). *The learning of generalized motor programs*. Unpublished doctoral dissertation, University of Southern California, Cal.
- Shapiro, D. C., Zernicke, R. F., Gregor, R. J. & Diestal, J. D. (1981). Evidence for generalized motor programs using gait-pattern analysis. *Journal of Motor Behavior*, **13**, 33-47.
- Sherrington, C. S. (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven: Yale University Press (reprinted, 1947).
- Slater-Hammel, A. T. (1960). Reliability, accuracy and refractoriness of a transit reaction. *Research Quarterly*, **31**, 217-228.
- Smith, J. L. (1969). *Fusimotor neuron block and voluntary arm movement in man*. Unpublished doctoral dissertation, University of Wisconsin, Wisc.

- Steinberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. In W. G. Koster (Ed.). **Attention and performance II**. Amsterdam: North-Holland Pub.
- Taub, E. (1976). Movements in nonhuman primates deprived of somatosensory feedback. **Exercise and Sport Sciences Reviews**, 4, 335-374.
- Taub, E. & Berman, A. J. (1968). Movement and learning in the absence of sensory feedback. In: S. J. Freedman (Ed.). **The neuropsychology of spatially oriented behavior**. Homewood, Ill: Dorsy Press.
- Thorndike, E. L. (1914). **Educational psychology**. New-York: Columbia University.
- Trowbridge, M. H. & Cason, H. (1932). An experimental study of Thorndike's theory of learning. **Journal of General Psychology**, 1, 245-260.
- Turvey, M. T., Fitch, L. H. & Tuller, B. (1982). Degrees of freedom, coordinative structures and tuning. In: J. A. S. Kelso (Ed.), **Human motor behavior: An introduction**. Hillsdale, New-Jersey: LEA.
- Terzuolo, C. A. & Viviani, P. (1979). The central representation of learning motor programs. In R. E. Talbot & D. R. Humphrey (Eds.). **Posture and movement**. New-York: Raven Press.
- Welford, A. T. (1968). **Fundamentals of skill**. London: Methuen.