

מידרג של מכונות*

מכונות

את המונח קיברנטיקה חידש בשנת 1948 המתמטיקאי נורברט וינר (Wiener) ואף קבע את תכולתו: תורת הבקרה והתקשורת בחי ובמכונה. מקור המונח במלה יוונית שמשמעותה היגוי, וממנה נגזרה גם המלה העברית קברניט. המושג הבסיסי בקיברנטיקה הוא מושג המידע, ועניינה - תקירת אופן זרימת המידע (התקשורת) בין חלקי המכונה או בין מכונות שונות. הקיברנטיקה אינה עוסקת בתכנון או בהנדסת מכונות, אלא בהסברת התנהגותם של בעלי-חיים ומכונות. חשיבותה בכך שהיא מאפשרת, באמצעות מינוח ושיטות חקירה אחידים, לנסח חוקים תקפים, החלים הן על מכונות והן על אורגניזמים.

כדי להגיע להבנת מהותה של מכונה ולדרג על-פי קני מידה קיברנטיים את מכלול המכונות הקיימות והאפשריות, נגדיר במדויק מושגים אחדים, ותחילה את המושג מכונה. ברור כי בעולם נייח (סטאטי) לחלוטין, עולם שאין בו שינויים, לא ייתכנו חיים ולא יימצאו מכונות. ביסודה של מכונה מונח אפוא מושג השינוי. השינויים המתחוללים במשך הזמן במכונה הם מעברים מ"מצבים פנימיים רגועים" אל מצבים פנימיים אחרים. מצב פנימי הוא כעין תמונה רגעית מדויקת של מקומם ההדדי של חלקיה, תמונה הקובעת באורח חד-משמעי את מצבה הכללי של המכונה. למשל, במאורר המסתובב במהירות של 10 סיבובים בשנייה, המצב הפנימי יכול להיות הזווית שלהב מסוים יוצר עם הכיוון האופקי, ומצב זה קובע באורח חד-משמעי את מקום כל הלהבים. המעבר הוא כזה שבכל מאית השנייה הזווית גדלה ב-36 מעלות.

התכונה החשובה ביותר במעבר ממצב למצב, תכונה המאפיינת מכונות, היא סדירות המעבר הזה. במונח סדירות אנו מתכוונים לכך שמכל מצב שהמכונה נמצאת בו היא עוברת, באופן הנקבע באורח חד-משמעי על-ידי המבנה הפנימי של המכונה עצמה, אל מצב אחד ויחיד ותמיד לאותו המצב.

* מר יהונתן עלון הוא מורה למתמטיקה במכללה לחינוך ע"ש דוד ילין.

משהגענו אל שלושת מושגי היסוד המתמייחים למכונות: מצב פנימי, מעבר ממצב למצב וסדירות המעבר הזה, נוכל להגדיר במדויק את המושג מכונה. קבוצה של מצבים תיקרא מכונה סדירה מוחלטת, או בקיצור מכונה, אם יש כלל-מעבר אפקטיבי, חד-משמעי וקבוע מכל מצב לאחד המצבים בקבוצת מצבים זו. כלל-המעבר נקרא התמרה מקבוצת המצבים אל קבוצת המצבים, ופעולת המכונה היא המעבר הסדיר הזה ממצב למצב. שלושה תנאים אלה מאפשרים למצוא בכל מכונה את המצב העוקב לכל מצב נתון.

המכונות שדנו בהן עד עתה, המכונות הסדירות המוחלטות, הן מכונות פשוטות ואין הן משקפות לאשורה את התנהגות המכונות הממשיות מסביבנו. מקורה של אי-התאמה זו בכך שמכונה, כהגדרתנו, פועלת לפי כלל התמרה אחד ויחיד, ומשכנסה לפעולה שוב אין לשנות את אופן פעולתה, והתנהגותה היא אפוא "מוחלטת". ואולם, הניסיון מלמד כי בתנאים שונים מכונות יכולות להתנהג באורח שונה ואופן פעולתן ניתן לשינוי בכל רגע. למשל, אפשר להפעיל מאוורר בשלוש מהירויות שונות וכן אפשר להפעילו עם תנועת המדחף עצמו ימינה ושמאלה או בלעדיה. במכונת כביסה ביתית אפשר להפעיל את התוף לסוגי כביסה וסחיטה שונים. הנהג שולט בביצועיה של מכונת באמצעות החילוכים.

בחירת תכניות פעולה שונות במכונה נעשית בדרך-כלל מן החוץ על-ידי ידיות וכפתורים מתאימים, ולכן אפשר לקרוא לה קלט. נוכל עתה להרחיב את הגדרת המושג מכונה ולהתאימה למציאות: מכונה עם קלט היא אוסף התמרות המוגדרות כולן על אותה קבוצת מצבים והמוצפנות על-ידי פרמטר או פרמטרים. הקלט קובע בכל רגע את ערכי הפרמטרים הללו, שאינם אלא שמות להבחנה בין תכניות פעולה שונות, ובכך הוא קובע את ההתמרה שעל-פיה המכונה פועלת.

משוב

מכונות מורכבות מחלקים או ממכונות אחרות. חיבור של חלקים או של מכונות אחדות למכונה אחת חייב להיעשות על-פי כללים ובחתימה לצרכים. מכונה א מצומדת אל מכונה ב אם הקלט של מכונה ב נקבע על-ידי מכונה א, לאמור: הוא בא מן הפלט של מכונה א. כאן הצימוד הוא בכיוון אחד, ובמצב זה מכונה א שולטת במכונה ב וקובעת את התנהגותה. ואולם, אפשר ליצור צימוד בשני הכיוונים, כאשר גם הקלט של מכונה א בא מן הפלט של מכונה ב. במקרה זה מתקבלת מערכת סגורה, הנקראת מערכת היזון חוזר. בדרך זו אפשר לצמד במעגל כל מספר סופי של מכונות, כאשר הפלט של כל

מכונה משמש קלט למכונה הבאה. במערכת כזאת הפלט, כולו או מקצתו, חוזר ומשמש חלק מן הקלט למערכת עצמה. חלק זה נקרא משוב.

יש להבחין בין מערכות שבהן המשוב חיובי לבין מערכות שבהן המשוב שלילי. להבנת ההבחנה הזאת נעיין בהפרש שבין הפלט הרגעי לבין הפלט הרצוי. משוב המביא להקטנת ההפרש הזה ייקרא משוב שלילי, ואילו משוב המביא להגדלתו ייקרא משוב חיובי. המשוב השלילי מנוצל במידה רבה בעולם החי, ואין כמעט פעילות ביולוגית שאין בה היזון חוזר שלילי. למשל, הושטת יד כדי לאחוז בחפץ המונח על שולחן משלבת כמה פעולות במעגל של משוב שלילי, המקטין את המרחק שבין היד לבין החפץ. מקומו של החפץ על השולחן הוא הקלט, שהוא גם הפלט הרצוי; מקומה הרגעי של היד הוא הפלט הרגעי, וההבדל ביניהם נקרא שגיאה. העיניים מעבירות את השגיאה אל המוח, שבו מיוצרים האותות הדרושים להפעלת השרירים המכוונים את היד באופן שהשגיאה הולכת וקטנה. בחשיבותו של מעגל זה ייווכח כל אדם שיערוך, בעצימת-עיניים, ניסוי כזה של הושטת יד כדי לאחוז בחפץ שמקומו בלתי ידוע.

במונח יציבות אנו מתכוונים להתנהגות שאינה חורגת מתחומים צרים והיא מושגת דרך כלל במערכות משוב שלילי. מצפייה במכונות אנו נוכחים לדעת כי לעתים יש קבוצת מצבים, שמרגע היכנס המכונה אל אחד מהם היא תימצא בה לעולם. קבוצה כזאת של מצבים המשתנים לפי סדר מסוים במחזוריות קבועה תיקרא מחזור. מקרה מיוחד וחשוב של מחזוריות הוא מצב שיווי-משקל, שהוא מצב שמרגע היכנסה אליו לא יחולו בה כל שינויים.

מצב A נקרא מצב של שיווי-משקל יציב אם לאחר כל הפרה קטנה של שיווי-המשקל חוזרת המכונה למצב A. למשל, כדור מתכת קטן בתחתית קערה עמוקה בצורת חצי כדור גדול הוא במצב של שיווי-משקל יציב, משום שלאחר הזאת הכדור במעלה הקערה ושחרורו הוא יתגלגל חזרה לנקודת התחתית. כאשר הפרעה קטנה גורמת למפולת בהתנהגות המכונה, הוא נקרא מצב של שיווי-משקל רופף. למשל, הזזה קטנה של כדור מתכת קטן המונח בקדקודה של קערה כשהיא הפוכה על פניה, תגרום לנפילתו ושוב לא יוכל לחזור למקומו. יציבות היא תכונה חשובה מבחינה מעשית, כי מכונות ממלאות את תפקידיהן רק כאשר הן פועלות במחזוריות קבועה והפלט שלהן יציב. על-כן, עניינו של מהנדס המכונות הוא במסלולי התנהגות מחזוריים, ומאמצים הנדסיים מרובים מושקעים להבטחת היציבות.

לעומת זאת אם פעולתן של מערכות משוב חיובי אינה נפסקת, הן מתפוצצות או קורסות. הגלקסיות, למשל, נוצרו מענני הגז ההיליים על-ידי פעולתו של

משוב חיובי בתהליך התכווצות מתמשך: ריכוזים אקראיים של חומר, שבהם כוח המשיכה גדול, מהווים מוקדי משיכה לחומר שמסביב, תהליך המגדיל את כוח המשיכה הזה עצמו וחוזר חלילה. בכל אחד מהמוקדים הללו נוצר כוכב, מתחיל תהליך של היתוך גרעיני והכוכב נמצא במצב של שיווי-משקל בין לחץ הקרינה לבין כוח המשיכה. לעתים מופר האיזון העדין הזה והכוכב מתפוצץ, או לחילופין מתחיל תהליך קריסה שסופו ננס לבן, כוכב ניטרונים או חור שחור, שצפיפות החומר בהם מופלגת.

יציבות-על

מכונה מגיעה אל מצבי שיווי-המשקל הרצויים אם היא מתוכננת ובנויה לכך מראש. כלומר: החיבורים והצימודים נעשו כך שאמנם תתקבל היציבות הרצויה. לבעלי-חיים יש תכונת יציבות גבוהה יותר, הקשורה ליכולתם ללמוד. זוהי יציבות-על, המתגלמת בבעלי-חיים בהומאוסטאסה: הם מחפשים ומוצאים את מצבי שיווי-המשקל הנאותים גם כאשר התנאים משתנים ואפילו מתהפכים. בניסוי שנערך בקוף ניתקו את העצבים המתקשרים אל שרירי הזרוע, שתפקידם להניע את היד, וחיברו אותם במהופך, כך שרצונו של הקוף לפשוט את ידו משך אותה ולהפך. בתחילה לא הצליח הקוף לתפקד כראוי, אך לאחר פרק זמן של הסתגלות הוא למד להניע את זרועו בצורה הנכונה.

שלושה תנאים הכרחיים ליכולת הלמידה של אורגניזמים.

הראשון, קיומם של משתנים "חיוניים", החייבים להימצא בתחום צר של ערכים כדי שהאורגניזם יישרד, כך שכאשר אחד מן המשתנים הללו חורג מן התחום הצר הזה נוצרות תחושות כאב, המתריעות על הסכנה הולכת וקרבה וגורמות לאורגניזם שיפעל לקראת מטרה אחת: החזרתו של המשתנה לתחום הנאות. למשל, ירידת רמת הסוכר בדם יוצרת תחושת רעב, המעוררת לחיפוש מזון.

השני, קיומם של מנגנוני חישה המעבירים אל המוח הודעות של כאב או עונג. השלישי, קיומה של קבוצה גדולה של התנהגויות אפשריות העומדות לרשות האורגניזם, התנהגויות המוצפנות על-ידי פרמטרים.

תהליך הלמידה מוסבר עתה בקיומם של שני מעגלי היזון חוזר, "פנימי" ו"חיצוני". המעגל האחד, הפנימי, קושר את האורגניזם אל הסביבה באמצעות החושים, השרירים ואיברי התנועה, והוא משמש אותו בצורה שוטפת בכל התנהגות קבועה שכבר נלמדה. במעגל ההיזון החוזר השני, החיצוני, הסביבה משפיעה באופן מיידי ובלתי אמצעי על המשתנים החיוניים באורגניזם. למשתנים הללו מצומדים גלאים ומנגנוני חישה של כאב ועונג, וכאשר יש

סכנת חריגה מתחום החיוניות נוצרת תחושת כאב. מנגנונים אלו קשורים אל מאגר הפרמטרים הקובעים את ההתנהגות. כאשר התנהגות קבועה, שכבר נלמדה, או התנהגות אקראית נסיונית בסביבה חדשה אינה נאותה וגורמת כאב, מתחוללים שינויים בפרמטרים, והאורגניזם מחפש התנהגויות אחרות שימנעו את הכאב. משנמצאה ההתנהגות הנאותה, הוא פועל על-פיה כל עוד היא מתאימה לתנאי הסביבה, ובמשך הזמן היא נלמדת ונעשית אוטומטית.

באמצע המאה הנוכחית בנה אשבי (Ashby) את ההומאוסטאט, מכונה המגלמת את עקרון היציבות העליונה הזאת ומסוגלת ללמוד ולהגיע בכל התנאים אל מצבי שיווי-המשקל הרצויים. ההומאוסטאט מורכב משני חלקים A ו-B המחוברים במעגל סגור. ב-A ארבעה מחוונים מצומדים זה לזה ומחוגיהם יכולים להימצא בכל מצב ביניים. ל-A מצבי שיווי-משקל רבים, שבהם כל מחוג נמצא או במרכז או באחד הקצוות, אך נקבע מצב שיווי-משקל "רצוי" יחיד, שבו כל אחד מן המחוגים מצוי במרכז. ב-B מפסק היכול להימצא באחד משני מצבים, "פתוח" ו"סגור", וכן 390625 צורות התנהגות שונות המתקבלות משורה של ארבעה מתגים, שכל אחד מהם יכול להימצא באחד מתוך 25 מצבים. התנהגויות אלה מוצפנות בפרמטרים, שערכיהם נקבעים על-ידי קלט אקראי המתחלף בכל פרק זמן קצר של שניות אחדות.

B תוכנן באופן כזה, שכאשר המפסק פתוח כל מצב של B אינו מצב של שיווי-משקל ולכן התנהגותו משתנה, וכאשר המפסק סגור כל מצבי B הם מצבי שיווי-משקל ולכן לא חל כל שינוי ב-B. הצימוד בין A ל-B נעשה כך: כשכל המחוגים של A במרכז, לאמור, כאשר נתקבל מצב שיווי-המשקל הרצוי, המפסק ב-B סגור ולכן אף B במצב של שיווי-משקל ולא חל שינוי בהומאוסטאט. כאשר לא כל המחוגים במרכז, נותר המפסק ב-B פתוח, ולכן התנהגותו של B משתנה עד ש-A מגיע למצב שיווי-המשקל הרצוי.

ניסוייו של אשבי הראו כי ההומאוסטאט חוזר תמיד ליציבות, גם כאשר הופכים חיבורים אחדים, וכי אפשר "לאמן" את ההומאוסטאט להתנהגות רצויה.

בסמוך לזמן שאשבי בנה את ההומאוסטאט שלו ניתח מדען אחר, וולטר (Walter), את תהליך ההתניה, שהוא מרכיב חיוני וחשוב במנגנוני למידה, ובנה מכונה שקרא לה (CORA (Conditioned Reflex Analog), מכונה המגלמת את שלבי התהליך הזה. בניסוי הקלאסי של פבלוב (Pavlov) צלצל פעמון זמן קצר לפני שהגישו לכלב את מזונו. לאחר כעשרים נסיונות נתברר כי הצלצל בלבד עורר את התגובה הייחודית להופעת המזון, יצירת רוק.

ולטר מצא כי שבע פעילויות חיוניות להצלחת תהליך ההתניה:

1. הבחנה בהימצאותו של הגירוי הייחודי, למשל מזון, על רקע גירויים סביבתיים;
2. זיהוי הגירוי הניטרלי המתמשך, "צלצול בפעמון", המתחיל זמן קצר לפני התחלת הגירוי הייחודי ונמשך זמן מה לאחריה;
3. היווצרות עיקבה של החלק המשותף לשני גירויים אלה, עיקבה ההולכת ודועכת עם הזמן, אם אין היא מחוזקת בניסויים נוספים. עיקבה זאת נאגרת בזיכרון לשם הערכה עתידית של מידת האקראיות בהימצאות שני סוגי הגירויים בסמיכות;
4. סיכום מצטבר של העקבות הללו לאורך זמן ההתנסות;
5. הצתה, שאצל האדם באה כהארה פתאומית, הנוצרת כאשר סכום כל העקבות חורג מרמת-סף של אקראיות;
6. זכירת המידע החיוני שנלמד, "צלצול משמעו מזון";
7. הגבה, שהיא הפקה של התגובה הנלמדת כל אימת שמופעל הגירוי הניטרלי.

מכשירים ומכונות קלסיות

בבואנו לסווג את המכונות על-פי קני-מידה קיברנטיים, נתחיל במכונות הקיימות, כדי שנקבל מושג על מגבלותיהן ונבין את מסלול שחרורן ממגבלות. מן המכונות הללו נקיש לגבי מכונות עתידיות אפשריות ונקבל מידרג של מכונות, מידרג המשקף את מהלך התפתחות המכונה לחירות מ"כבלי אנוש" ולעצמאות גדלה והולכת בתפקוד. את כל המכונות האפשריות אפשר למיין לשמונה רמות התפתחות.

המכשיר, שלמעשה אינו מכונה, יסווג כמכונה ברמה 0. המכשיר מאופיין בכך שהוא מיועד לשימוש ייחודי ומופעל בידי האדם עצמו. מגבלותיו של המכשיר רבות, והעיקרית שבהן היא אי-יכולתו לבצע פעולות בעצמו, בלא יד אדם. מכשירים לרוב מצויים בסביבתנו: פטיש, מסור, מברג, מספריים ואחרים.

המאפיין את המכונה הוא צריכת אנרגיה הבאה בדרך כלל ממקור חיצוני לאדם. עלינו להבחין בין שני סוגי אנרגיה הדרושים לעתים להפעלת המכונה. האחד הוא האנרגיה הדרושה לביצוע הפעולה עצמה, והאחר הוא האנרגיה הדרושה לבקרה. במכשירים האדם מספק הן את אנרגיית הבקרה והן את אנרגיית הביצוע. במכונות, מקור עצמי או חיצוני מספק את אנרגיית הביצוע ובחלקה יכולה לשמש לבקרה. אנרגיית הבקרה אפשר שתבוא גם מן האדם. למשל, במכונות הכתיבה הישנות לחיצת היד של האדם סיפקה הן את הבקרה והן את אנרגיית הביצוע. במכונות כתיבה חשמלית אין האדם מספק

את אנרגיית הביצוע אלא את הבקרה בלבד, משום שדי בנגיעה קלה להפעיל את הקליד הדרוש.

המכונות הפשוטות ביותר הראויות לשם הזה הן אפוא מכשירים שהפעלתם נעשית באמצעות מקור אנרגיה עצמי או חיצוני. אלו הן המכונות ברמה 1. דוגמאות למכונות מרמה זו הן כל סוגי הקלידים (במכונות ניקוב או בכלי נגינה), מקדחות חשמליות, פטישי אוויר, מצלמות פשוטות.

המאפיין את המכונות ברמה זו הוא אפוא יכולתן לבצע פעולה אחת ויחידה, וזו מגבלתן.

לכן נסווג ברמה 2 את המכונות המסוגלות לבצע מגוון פעולות, בשרשרת או במקביל, על-פי תכנית פעולה הטבועה במבניהן. מכונות רבות בסביבתו של האדם הן מכונות מרמה זו: מנגנונים קלאסיים למיניהם (שעונים, תיבות נגינה), מכונות דפוס ישנות, מכונות חישוב, מכונות משרדיות לצילום מסמכים. במכונות אלה רכיבים המחברים ליחידה אחת על-פי עקרונות הצימוד הנכונים.

מכונות ברמה 2 מאופיינות אפוא ביכולתן לבצע פעולות מרובות מתוך תיאום.

גם למכונות מרמה 2 יש מגבלות, למשל אין הן מתחילות ומפסיקות את פעולותיהן בעצמן. לדוגמה, במכונה לצילום מסמכים, כאשר ערמת הנייר נגמרת או כאשר הצבע אזל אין המכונה יודעת להפסיק את פעולתה ודרושה התערבות חיצונית מצד המפעיל. המכונות ברמה 3, חוץ מיכולתן לתאם בין כמה פעולות, יודעות גם מתי להתחיל ומתי להפסיק פעולות אלו לפי הצורך: כאשר פעולה מזיקה או חסרת תועלת הן מפסיקות פעולה זו, ולהפך, כאשר מתעורר הצורך לנקוט פעולה חיונית הן מבצעות אותה. אלו הן כל המכונות המצוידות במנגנוני חישה וגלאים, כגון גלאי עשן המפעיל מנגנון אזעקה ומתחיל בפעולות כיבוי ראשוניות או גלאי צבע המגלה אם מיכל הצבע ריק. מאזניים שעליהם מונח המיכל יכולים לשמש מעין גלאי כזה.

המכונות ברמה 3 מאופיינות ביכולתן להחליט בעצמן על נקיטת פעולה או על הפסקתה.

מכונות קיברנטיות פשוטות

המכונות שתוארו עד עתה כולן קלאסיות, ועקרונות פעולתן היו ידועים גם לפני עידן הקיברנטיקה אף כי אולי לא נוצלו עד תום. הקידמה הטכנולוגית בימינו ובעיקר הנדסת החשמל והאלקטרוניקה מאפשרות בניית מכונות שביצועיהן מרשימים.

אנו מגיעים עתה אל מכונות מתקדמות יותר, הפועלות על-פי עקרונות קיברנטיים מובחקים.

כדי לאפיין את המכונות מרמה 4 נחפש את מגבלתן העיקרית של המכונות מרמה 3. המכונות ברמה זו אמנם יודעות להחליט על הצורך בנקיטת פעולות או הפסקתן, אך אינן מסוגלות להתאים את פעולותיהן לנסיבות משתנות ולייצבן כאשר יש סטיות קלות מן הערך שנקבע לפלט. למשל, אם במכונת צילום המצוידת בגלאי צבע קצב הזרמת הצבע אינו נאות, איכות התמונות פוחתת, אך הגלאי אינו מסוגל להתריע על הירידה באיכות, קל וחומר שאינו יכול להביא להסדרת זרימת הצבע.

כיצד מתגברים על מגבלה זו? מתברר כי עומד לרשותנו עיקרון יעיל ליצירת יציבות סביב ערך נאות של הפלט, עקרון המשוב השלילי. המאפיין תהליכים המאורגנים במשוב שלילי הוא יציבותם. לכן אם מצמידים למכונה גלאי בהירות המתוכנן למזוד את רמת הבהירות בתמונה, אפשר לנצל את מידת הבהירות הנמדדת על-ידי הגלאי לשם הסדרת זרימת הצבע. כאשר התמונה בהירה מדי יישלח אות מן הגלאי אל מכל הצבע, וזה יגרום להגדלת כמות הצבע הנצרכת בכל צילום, ולהפך, כאשר התמונה כהה יגרום האות לכך שתופחת כמות הצבע בצילומים הבאים. כאשר רמת הבהירות היא נאותה לא ייעשה כל שינוי בקצב הזרמת הצבע. כך נוצר מעגל היזון חוזר שלילי מן הגלאי המודד את רמת הבהירות אל ספק הצבע ובהירות התמונה תישאר ברמה אחידה.

מכונות ברמה 4 מאופיינות בכך שהן מנצלות את עקרון המשוב השלילי ליצירת יציבות.

האם יש למכונות מרמה 4 מגבלות? אכן, גם להן יש מגבלות, והעיקרית שבהן: הדרך אל היעד הסופי שסביבו צריכה המכונה להתייצב נקבעת בידי האדם. במלים אחרות, אין להן חופש בבחירת הדרך להגשמת המטרות שהוצבו להן. במכונות מרמה 4 קובע היעד הסופי את אופן צימודם של חלקי המכונה. בצימוד לא נכון לא תתייצב המכונה סביב היעד הדרוש. למשל, בטייס אוטומטי, שתפקידו בין השאר לשמור על אפקיות כנפי המטוס, החיבור מן המאזנת אל חבקר נעשה כך שבנטיית הכנף הימנית מטה כתוצאה מהפרעה, חבקר מביא להטיית המאזנת הימנית מטה והמאזנת השמאלית מעלה, והמטוס מתאזן. היפוך החיבורים יגרום לכך שנטייה קטנה מטה תביא לנטייה גדולה יותר עד לסחרור המטוס ונפילתו.

האם אפשר בכלל לדרוש ממכונה שתתייצב סביב הערך הדרוש של הפלט גם כאשר הצימוד אינו נכון ואפילו הפוך? למרבה הפליאה יש מכונות כאלה ואנו

תיארנו מכונה כזו, ההומאוסטאט של אשבי (Ashby). כזכור, עומדות לרשות ההומאוסטאט דרכי פעולה רבות ובחיפוש אקראי הוא מגיע תמיד אל שיווי-המשקל הרצוי. עקרונית אפשר לחבר את הטייס האוטומטי אל הומאוסטאט שבו נקבעו המצב המאוזן והמצבים שבהם חלה הקטנה בסטיית הכנפיים מן הכיוון המאוזן כמצבי שיווי-משקל רצויים. לפיכך, גם כאשר הצימוד בין המאזנת וחבקר הוא הפוך, יתאזן בסופו-שלב דבר המטוס לאחר כל סטייה: ההומאוסטאט ישנה את התנהגותו בעקביות ובהתמדה כל עוד יש סטייה מן המצב המאוזן. רק כשתימצא התנהגות המביאה להקטנת הסטייה יחדל ההומאוסטאט מחיפושיו והסטייה תדעך עד שתיעלם.

את המכונות ברמה 5 מאפיינת יכולתן לקבוע בעצמן את הדרך להשבת מצב שיווי-המשקל הרצוי, כאשר הסטייה היא בגבולות סבירים, תכונה הנקראת הומאוסטאסה.

מכונות קיברנטיות מתקדמות

המכונות ברמה 5 במדרג עדיין מצויות בראשית התפתחותן ואנו מבקשים להציץ אל העתיד הצפוי להן.

היש מכונות ברמה גבוהה יותר? כדי לענות על שאלה זו נבחן את מגבלותיו של ההומאוסטאט. המגבלה העיקרית שלו היא אי-יכולתו לקבוע את מטרותיו בעצמו.

מכונה ברמה 6 תהיה אפוא מכונה המציבה לעצמה מטרות ופועלת להגשמתן. זו רמת הרובוט המתקדם המתואר בספרי המדע הבדיוני, שהתנהגותו דומה להתנהגות האדם. ברובוט כזה יימצאו, מלבד חושים ואיברי תנועה, גם מנגנוני למידה משוכללים במתכונת מעגלי ה"תרגול" של ההומאוסטאט ומעגלי ההתניה של CORA, והוא יוכל להתמודד עם משימות מורכבות. בהומאוסטאט הלמידה היא אקראית ואילו ברובוט המתקדם יהיה תהליך הלמידה מקוצר והחלטי וינצל כללי חשיבה, שיקול דעת וסברה וכן כלים לוגיים-פורמליים כמו תחשיב הפסוקים ותחשיב הפרדיקטים, באופן שיוכל להסיק מסקנות מהנחות כפי שהדבר נעשה אצל האדם.

את הרמה הזאת מאפיינת אפוא הצבת מטרות והשגתן בתהליכים הומאוסטאטיים וביכולת למידה. אחת המסקנות הנובעות מכך היא שרובוט כזה מסוגל לתחזק את עצמו, כלומר: לאתר תקלות בפעולותיו, למצוא את סיבותיהן ולתקן או להחליף את הרכיבים הלקויים בגופו.

האם יש לו מגבלות? האם אין בכך משום הענקת אורך חיים אינסופי לרובוט כזה? מתברר כי בהנחה שההסתברות לפגם ברכיב היא סופית ואינה 0, משמע שכל רכיב בסופו של דבר נפגם, לא יהיה רובוט כזה בן אלמוות גם אם נספק

לו רכיבים בלא הגבלה. יתר-על-כן - גם אם יצויד במנגנון גילוי חלקים פגומים, המסוגל לגלות ולתקן פגמים במנגנון זה עצמו, גם אז לא יהיה רובוט כזה אלמוני. חישובים מראים כי אורך חייו של הרובוט יהיה בערך כריבוע אורך חיי חלקיו. אם, למשל, אורך החיים הממוצע של כל רכיב נמדד בעשרות שנים, יימדד אורך חייו של הרובוט במאות שנים. נראה שמסקנה הכרחית משיקולים אלה היא כי "אדם הוא בר-תמותה".

ואולם יש מגבלה נוספת למכונות ברמה 6, וכדי להבינה נבדוק מה קורה בבעלי-חיים. כל בעל-חיים בא לאוויר העולם עם מטען של ידע שנצבר במשך הדורות. מטען זה מתבטא אצל כל פרט באינסטינקטים וברפלקסים, שתפקידם להבטיח את הישרדות הפרט והגזע. אין לפרט שליטה על מטען ידע זה, המשתנה בתהליך תורשתי של העברת התכונות החשובות להישרדות מדור לדור. תורשה זו מושפעת במידת-מה באורח אקראי מן הסביבה ובכך מעשירה ומשביחה את מאגר הגנים. התפתחות הגזע על-פי עקרונות הברירה הטבעית, כפי שתיאר דרווין (Darwin), היא בבחינת תכנון וארגון עצמיים. מכונות ברמה 7 הן אפוא מכונות שיש להן יכולת של ארגון עצמי, התפתחות והשתפרות. בטבע מתממשת רמה זאת בגזעים בעלי כושר התרבות, גזעים החולכים ומשביחים בדרך של הישרדות הפרטים המתאימים לסביבתם והכחדת האחרים, מטרה המושגת באמצעות מנגנון תורשה מצומד אל סביבה עשירה בגירויים אקראיים. האם מובטח קיומו של גזע כזה לנצח? שיקולים עיוניים מראים כי לשם כך יש צורך במרתב מחיה אינסופי. מסקנה אפשרית משיקולים כאלה היא, כי בלא היכולת להתפשט בחלל ולאכלס כוכבים מרוחקים בלא הגבלה, יגווע כנראה הגזע האנושי על-פני כדור הארץ.

היש מגבלות למכונות ברמה 7? מתברר כי למכונות אלה יש מגבלה יחידה: החומר מסופק להן מן החוץ, אין הן מייצרות אותו בבחינת יש מאין ואין להן שליטה על היווצרותו. נוכל עתה לשאול: היש מכונות ברמה 8? כאן אנו מגיעים לתחום הטרנסצנדנטלי, אבל מתוך המשכת כיוון המחשבה נוכל לומר כי אכן יש מכונה אחת ויחידה ברמה 8, והיא המכונה האחרונה: היקום שאין לו כל מגבלות והוא סיבת עצמו.

מודל של מפעל קיברנטי

במפעלים האוטומטיים של ימינו מלאכות הארגון, הניהול והפיקוח נעשות בידי אדם, אך במפעל הקיברנטי העתידי הן יופקדו בידי מכונות. המוח הקיברנטי המתוכנן לניהולו של מפעל כזה מורכב מארבע מכונות, שלכל אחת מהן תפקיד ייחודי המבוצע בתיאום עם המכונות האחרות. נתאר להלן בקווים כלליים מכונה כזאת, שנבנתה בחלקה ונוסתה בהצלחה.

היחידה הראשונה, T, דומה לאותו חלק במוח האנושי המופקד על עיבוד המידע המגיע מן החושים או מן התחושות העצמיות של האדם. T מזחה קבוצה S של גירויים אפשריים, חיזוניים, הבאים מחוץ למפעל, או פנימיים, הבאים ממכונות אחרות במפעל או במוח הקיברנטי עצמו. S היא אוסף של נתונים, למשל על כמויות, עלויות רכישה וייצור, מחירים של חומרי גלם ומוצרים מוגמרים, שערי מניות ומטבעות חוץ.

את הגופים הגשמיים מאפיינות קבוצות של גירויים הפועלים בדרך כלל על חושים שונים. לוורד למשל צורה ייחודית, מרקם אופייני, צבע וניחוח מוגדרים. כל אלה יחד מהווים "תצורה" של גירויים המאפיינים את הוורד. כדי להעניק ל-T יכולת זיהוי, מכלילים בה קבוצת תצורות של גירויים. כל תצורה היא תת-קבוצה מוגדרת היטב של S. תצורות הן למשל קצב קבלת חומרי הגלם, יעילות ניהול המלאי והייצור, איכויות התפוקה, מדדי שערי מניות בבורסה ועקומות הביקוש למוצרים המוגמרים.

התצורות הללו מכילות מידע גלמי רב. על-ידי סידרה מוגדרת ומפורטת של התמרות ופעולות מתמטיות וסטטיסטיות תחשב T נתונים סופיים, שיתועדו בזיכרון וישמשו את המוח בקבלת החלטות. דוגמאות לחתמרות הללו הן: חישובי מתאימים, סילוק תנודות אקראיות, גילוי מחזוריות מבנית, הזזה וסיבוב של הנתונים, תיקון, נירמול (התמרה לשם קבלת עקום קרוב לעקום הנורמלי) וחישובי שאריות (ביחס לכמה מספרים ראשוניים נבחרים).

במקביל למכונה T תימצא מכונה V, הבנויה במתכונת דומה ל-T אלא שתפקידה הוא "תנועת" (מוטורי) בעיקרו. לעומת T, שקלטה ועיבדה נתוני חושים ותחושות בלבד, תקלוט V ותעבד תנועות של המפעל ושל העולם החיצוני. לכן V היא קבוצה M של גירויי תנועה אפשריים, כגון השבתה או הפעלה של מכונות, גילוי פגמים בפעילותן, קבלת חומרי גלם. בדומה ל-T יש בה תצורות של גירויים, למשל סוגי ליקויים במכונות או בקצב הייצור של מוצר. מתצורות אלו היא מעבדת הוראות תנועה המהוות הצעות לתכניות פעולה.

המכונות T ו-V חופפות במידת-מה זו לזו ותפקידן לארגן קלט חושי ומוטורי ולהגיע למסקנות ביצוע. שתי מכונות אלו נבנו כאמור ונוסו במפעל פעיל. ואולם יש צורך במכונה מפקחת U, שתתאם את פעילויותיהן ותחפש, תמצא ותשמר מצבי שיווי-משקל. באמצעות המכונה R המתוארת להלן תלמד V במשך הזמן להפעיל קני-מידה נאותים, שעל-פיהם היא תגיע למסקנה כי יש לבצע פעילות מסוימת, או לחלופין - לחדול או להימנע מפעילות זאת. U תקלוט את החמלצה המוצעת ותבדוק את מצבי שיווי-המשקל שיווצרו לאחר ביצוע החמלצה. המכונה U מתקבלת על-ידי צימוד T ו-V בלולאת

יצבות-על במתכונת ההומאוסטאט של אשבי (Ashby). כאמור, גם מכונה U
כזאת אפשר לבנות ויש להניח כי היא תיבנה בעתיד הקרוב.

במצב כזה נשקפת סכנת שקיעה ב"תרדמה", כשהפעילות תחוג בתחום צר של
שיווי-משקל ואף תלך ותדעך. לכן יש צורך במכונה נוספת R, שתפקידה לעורר
את המערכת ולהתריע מפני סכנות. R מצוידת במנגנון לתחושות כאב ועונג,
ותפקידה לשפוט איזה מבין מצבי שיווי-המשקל המחושבים על-ידי U הוא
הטוב ביותר למערכת משיקולי "שכר ועונש". R ממונה אפוא על חשיבה
ערכית, וממלאת תפקיד מקביל לזה של ה"אני העליון" אצל האדם. היא
חיונית ליצירת מנגנוני למידה, כי בלא שכר ועונש אין למידה.

המחשב

המחשב הוא מכשיר רב עוצמה ורב שימושים, אך ניצולו המלא הוא רק
בתחילת הדרך. המחשבים הראשונים נוצרו בידי אנשי מדע ומדרך הטבע הם
נוצלו לצרכים מדעיים. לאחר שהוכנסו מחשבים למערכות מינהליות, חלה
במובן-רמה נסיגה ברמת השימוש בהם, אך ברור כי המחשב ילך ויתפוס את
המקום הראוי. בדומה לדירוג המכונות בכללותן על-פי רמת התפתחותן, אנו
מבקשים עתה לדרג את שימושי המחשב על-פי מידת תחכומם.

רמה 1 - הדפסה.

זו הרמה הנמוכה ביותר, שבה המחשב משמש כמפעיל של מדפסת. המידע על
קבוצה גדולה של פרטים מאורגן בקבצים גדולים, ובאמצעות תכניות
פשוטות הוא נשלף ונשלח להדפסה.

רמה 2 - עיבוד נתונים.

המחשב מנוצל לעיבודים שיש בהם תחכום מסוים: נתונים מותמרים למידע.
השימושים העיקריים ברמה זאת הם עיבודים סטטיסטיים שגרתיים כגון
סיכום, עריכה והדפסה של לוחות מפורטים ולוחות מסכמים והנהלת
חשבוניות.

רמה 3 - מחקר, מעקב ותקשורת.

התחלת ניצול משאבי המחשב לצרכים מדעיים: מן המידע מתגבשת ידיעה.

ברמה זו נעזרים במחשב לפתרון בעיות מתחומי המחקר בכל המדעים.
באמצעות שיטות של אנליסה נומרית פותרים משוואות אלגבריות,
דיפרנציאליות, אינטגרליות ואחרות. השימושים הסטטיסטיים המתקדמים
כוללים ניתוחים רב משתניים, אמידה, דגימה, בדיקת השערות, ניתוח גורמים
וניתוח סדרות עתיות. השימושים המינהליים המתקדמים כוללים הקמת

מסדי נתונים, ניהולם ושימוש בהם, עיבוד תמלילים, גרפיקה ותקשורת
אלקטרונית.

רמה 4 - תכנון.

נסיון העבר משמש לתכנון העתיד: מודלים מתמטיים וסטטיסטיים בתחומי
מדעי הטבע, החיים והחברה מוצאים אל הפועל באמצעות כלים נאותים:
הדמיה (סימולציה), אופטימיזציה, חיזוי, תכנון הנדסי, תיכון ותכנון ייצור.

רמה 5 - אוטומציה.

ניצני הרמה הזאת נראים כבר עתה במסגרת הרובוטיקה. המחשב מנוצל
להשגת פיקוח, בקרה, שליטה והסדרה של מערכות גדולות. הוא משולב
במעגלי היזון חוזר עם הסביבה באמצעות חושים ואיברים, מאתר שגיאות,
מחפש ומוצא מצבי שיווי-משקל וחותר לביצוע משימות שהוצגו לו. המפעלים
האוטומטיים ברמה זו עדיין בניהול האדם ובפיקוחו.

רמה 6 - תבונה.

המחשב משתחרר מתלות באדם. כאשר ישולבו בו מערכות הומאוסטאסה
יוכל לתחזק את עצמו ולהתפתח בדרך של למידה. שיקול דעת וכושר ההכרעה
שיחיו למחשב ברמה זו יאפשרו לו לפעול כמרכז בקרה קיברנטי במפעלים
אוטומטיים אמתיים, מפעלים שבהם אין צורך באדם אפילו בדרג של ארגון,
ניהול ופיקוח.

רמה 7 - מודעות עצמית.

ברמה הגבוהה ביותר, רמת ההכרה העצמית, יוכל המחשב לנהל שיחות
חופשיות ולתרגם תרגום נכון משפה לשפה. יותקנו בו גלאים משוכללים,
מעגלי חישה של כאב ועונג ויווצרו קשרים מרובים בין חלקיו. אף ייתכן
שיתפתחו בו רגשות וידמה לאדם.

הערות

המאמר הנוכחי עוסק באחד הנושאים מתוך יחידת-לימוד במבוא
לקיברנטיקה. המטרה בפיתוח היחידה היא להציג את המושגים, הנושאים
והעקרונות החשובים הקשורים למכונות ולאופן פעולתן.

הגדרות המושגים מכונה, מכונה עם קלט, צימוד ואחרים מובאות במתכונת
המוצגת על-ידי אחד מראשוני החוקרים, אשבי (Ashby) בספרו [1].

מיון המכונות במידרג לפי מידת עצמאותן נעשה על-פי [2].

הגדרת המושג יצבות-על ותיאור ההומאוסטאט ואופן פעולתו סוכמו לפי
אשבי [3].

9. Wiener, N., *Cybernetics*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1961.
10. Wiener, N., *Ex-Prodigy, I Am A Mathematician*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1953.
11. גילבו ג.ת., *הקיברנטיקה מהי? הוצאת מערכות*, 1960.
12. וינר נורברט, *אנשים ומוחות מכונה*, ספרית פועלים, 1964.

ניתוח שבעת השלבים בכל פעולת התניה וכן תיאור המכונה CORA של וולטר (Walter) מצויים בספרו [4].

המודל של מפעל קיברנטי מופיע במאמר של ביר (Beer), שהתפרסם בקובץ [5].

הטענה כי אורך חייו של רובוט המצויד במנגנוני תיקון-עצמי אינו בהכרח אינסופי מוכחת במאמר המתפרסם באותו קובץ [6].

הספר הראשון בהיסטוריה הנושא את השם קיברנטיקה [7] נכתב בידי וינר (Wiener) עצמו, ואולם אין הוא קל כל עיקר. ספריו [8] הם אוטוביוגרפיה ומכילים תיאורים היסטוריים משנותיה הראשונות של הקיברנטיקה.

ספרו של ארביב (Arbib) [9], דן בהיבטים אחדים של בינה מלאכותית מתקופת ראשית התהוותה ובמגבלותיה כתוצאה ממשפט אי השלמות של גידל (Godel).

[10] הוא אסופה של מאמרים, שבינתיים נעשו קלאסיים, בשאלה האם מכונות יכולות לחשוב ולחוש כבני-אדם.

הקורא המתעניין יוכל למצוא ספרים נוספים רבים בלועזית ורק יחידים בעברית. מבין הספרים בעברית נזכיר את [11, 12].

ביבליוגרפיה

1. Arbib, M.A., *Brains, Machines and Mathematics*, Mc-Graw-Hill Book Company, 1964.
2. Ashby, W.R., *Design for a Brain*, Chapman and Hall, London, 1976.
3. Ashby, W.R., *An Introduction to Cybernetics*, Methuen & Co. Ltd., London, 1965.
4. Beer, S., "Toward a Cybernetic Factory" in *Principles of Self-Organization*, H. Von Forester, W. Zopf, Jr., Editors, Pergamon Press, 1962.
5. De Latil, P., *Thinking by Machine, A Study of Cybernetics*, Sidgwick and Jackson, London, 1956.
6. Lofgren, L., "Limits of Automatic Error Correction" in *Principles of Self-Organization*, H. Von Forester, W. Zopf, Jr., Editors, Pergamon Press, 1962.
7. Ross Anderson, Alan *Minds and Machines*, Prentice-Hall, Inc., 1964.
8. Walter, W.W., *The Living Brain*, Penguin Books, 1968.