

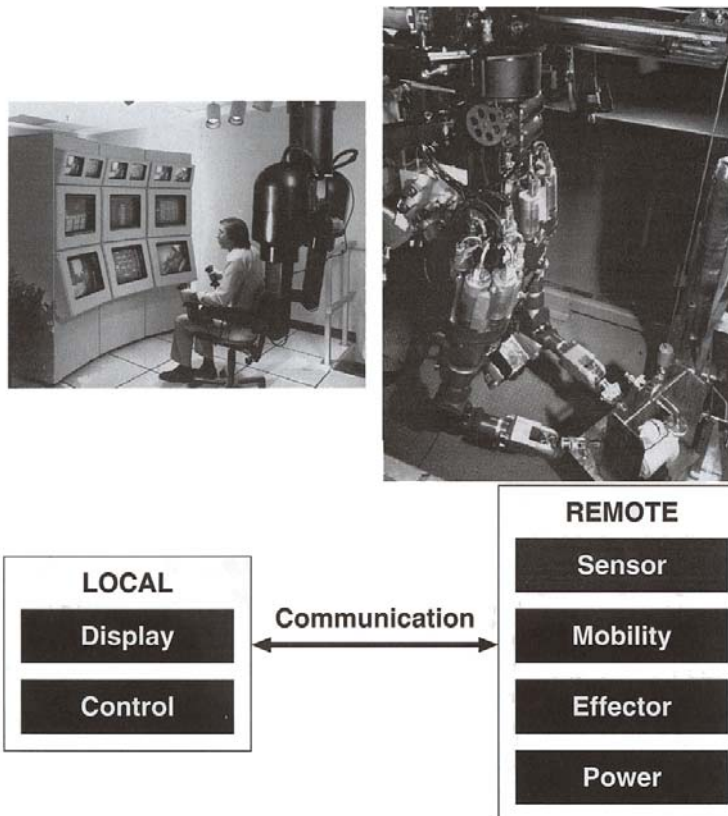


1. הצגת הבעיה - המשך

1.2. רקע תיאורטי

"הפעלה מרחוק" (Teleoperation):

אנו משתמשים במונח הפעלה מרחוק כאשר קיים מפעיל אנושי אשר שולט ברובוט ממרחק¹. הקונוטציה הנכונה של הפעלה מרחוק היא כאשר המרחק בין המפעיל לרובוט גדול מאוד עד כדי כך שהמפעיל אינו מסוגל לראות מה הרובוט מבצע, כך שמכוניות צעצוע אשר נשלטות ע"י שלט רדיו אינן מוגדרות מערכות הפעלה מרחוק. למפעיל ולרובוט ישנה מערכת יחסים מסוג של אדון-עבד (master-slave). ברוב המקרים, המפעיל האנושי יושב בתחנת עבודה ומכוון את הרובוט דרך ממשק כלשהו כפי שניתן לראות בתמונה 1.1.



תמונה 1.1 – יישום של מערכת הפעלה מרחוק.

ממשק השליטה יכול להיות ידית היגוי, התקן מציאות מדומה או אין ספור ממשקים חדשניים. המפעיל האנושי בד"כ מוגדר בתור האלמנט המקומי (local) משום שהוא נמצא בתחנת העבודה המקומית, בעוד שהרובוט בד"כ מוגדר בתור האלמנט הרחוק (remote) משום שהוא מתפקד במיקום רחוק מהמפעיל. למערכת המקומית חייבים להיות סוג של

¹ הכוונה במונח "tele" היא רחוק/מבודד (remote).

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



אמצעי תצוגה ומכניזם שליטה, בזמן שלמערכת המרוחקת חייבים להיות חיישנים, אמצעי לביצוע פעולות, אפשרויות הנעה, ובמקרה של רובוט נייד, ניידות.² המפעיל המקומי אינו יכול לדעת בכל רגע מה בדיוק המערכת המרוחקת מבצעת, אם משום שהמערכת מרוחקת באופן פיזי (למשל, על מאדים) או שהמפעיל חייב להיות ממוגן (למשל, בכור אטומי). לכן, חיישנים שרוכשים מידע על הסביבה המרוחקת, טכנולוגית תצוגה שמאפשרת למפעיל לראות נתונים שמגיעים מהחיישנים לגבי הסביבה המרוחקת וחיבור התקשורת בין המערכת המקומית למרוחקת הינם מרכיבים קריטיים במערכת הפעלה מרחוק.

הפעלה מרחוק היא פתרון מקובל עבור שליטה במערכות מרוחקות משום שטכנולוגיית הבינה המלאכותית (AI) אינה מתחרה ברמתו של המפעיל האנושי, במיוחד במונחים של תפיסה וקבלת החלטות בזמן אמת. דוגמא אחת של מערכת הפעלה מרחוק היא רובוט המשמש לחקירת אתרים תת מימיים (כדוגמת הטיטניק). אחד היתרונות של שליטה אנושית ברובוט היא שהמפעיל מסוגל לבדוד אובייקט מסוים אפילו אם הוא מכוסה בבוץ בתוך מים עכורים.

מפעיל אנושי מסוגל לבצע פעולות שדורשות מיומנות (לדוגמא, הברגת אום על בורג), שיחסית מסובכות לתוכנה של מניפולטור.³



תמונה 1.2 – הרובוט Sojourner על הכוכב מאדים.

דוגמא נוספת היא הרובוט Sojourner (מוצג בתמונה 1.2) אשר חקר את הכוכב מאדים מהחמישה ביולי ועד ל- 27 בספטמבר 1997, עד שהוא חדל להגיב לפקודות שנשלחו אליו ברדיו. מכיוון שהיה מידע מועט מאוד על מאדים לפני הביקור של הרובוט Sojourner, היה קשה לפתח חיישנים ואלגוריתמים המסוגלים להבחין בתכונות חשובות או אפילו אלגוריתמים לתזוזת הרובוט. במקרה זה גם חשוב מאוד שכל תצורת סלעים בלתי רגילה

² קיימים גם רובוטים שתפקידם אינו בהכרח לבצע פעולה מסוימת אלא לסרוק שטח מסוים, לכן, במקום אמצעי לביצוע פעולות יש לרובוט מכלול של מצלמות.

³ מניפולטור הינו רובוט המורכב מזרוע שמבצעת פעולה מסוימת שהוגדרה מראש. רובוט זה נפוץ מאוד בתעשיית הרכב.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



תובחן.⁴ בני אדם מיומנים בהתאמת התפיסה שלהם, במיוחד בצורות מסוימות וסטיות בתמונות, בנוסף לכך, בני אדם מיומנים גם בפתרון בעיות. כאשר חללית ה-Mars Pathfinder נחתה על מאדים, כריות האוויר שתפקידן היה לרפד את הנחיתה לא התרוקנו כראוי. כאשר "עלי הכותרת" של רכב הנחיתה נפתחו, כריות האוויר היו מכשול בדרכו של ה-Sojourner. הפתרון: פקחי הקרקע שלחו פקודות לבטל את פתיחת "עלי הכותרת" ולפתוח אותן שוב. מציאת סוג כזה של פתרון לבעיה כמעט ואינו אפשרי עם יכולות הבינה המלאכותית הנוכחיות.

למרות זאת, הפעלה מרחוק אינה הפתרון האידיאלי עבור כל המצבים. משימות רבות חוזרות על עצמן ומשעממות. לדוגמא, נניח שעלינו לנהוג במכונית עם שלט רחוק בעזרת מוט היגוי; לאחר כמה שעות, קשה יותר לשים לב לנהיגה. כעת נדמיין כי אנחנו מבצעים את הנהיגה הזו כאשר אנו מסתכלים רק דרך עדשתה הקטנה של מצלמה הממוקמת בחזית המכונית, המשימה הופכת להיות קשה יותר בגלל שדה הראייה המצומצם; ביסוד הבעיה היא העובדה שאין ראייה היקפית. בנוסף לכך, המצלמה לא מעבירה תמונות חדשות באופן רציף אלא עם השניות משום שלתקשורת יש רוחב פס מוגבל. מרבית האנשים חווים במהרה עייפות הכרתית⁵; תשומת הלב שלהם נודדת והם אפילו עלולים לחוות כאבי ראש או תסמינים פיזיים אחרים הקשורים למתח. אפילו אם התצוגה מעולה, המפעיל מרחוק עלול לקבל "מחלת סימולטור" בעיקר בגלל ההבדל שקיים בין מערכת התצוגה שמדווחת כאילו שהמפעיל בתנועה, לעומת העובדה שהוא אינו זו כלל ממקומו.

חיסרון נוסף ההופך את ההפעלה מרחוק ללא יעילה הוא זמן ההשייה גדול. זמן ההשייה גדול עלול ליצור מצב בו המפעיל שולח פקודה מרחוק בלי להיות מודע לעובדה שהפקודה תציב את המערכת המרוחקת בסכנה. לחילופין יכול להיווצר מצב בו אירוע לא צפוי מתרחש, כגון סלע שנופל, ומשמיד את הרובוט הרבה לפני שהמפעיל יקבל את המידע על האירוע ויורה לרובוט לזוז בכדי למנוע את הפגיעה. חוק אצבע⁶ בנוגע לכך הוא שהזמן שלוקח לבצע פעולה מסוימת בהפעלה מרחוק גדל באופן ליניארי עם השהיית השידור. לדוגמא, פעולת הפעלה מרחוק אשר אמורה לקחת דקה אחת במידה והיא מתבצעת על כדור הארץ תיקח שתיים וחצי דקות במידה ואנו רוצים לבצעה על הירח, ומאה וארבעים דקות על מאדים. לאחרונה הושגה התקדמות בנושא "הצגת תחזית" (predictive display) אשר מציגה באופן מיידי את תוצאת הסימולציה של הפקודה שנשלחה לרובוט. השפעת תופעת ההשהיה אינה מוגבלת למערכות קרקעיות. דוגמא נוספת ליישום המופעל מרחוק הוא המל"ט (מטוס ללא טייס) אשר בשימוש בצבאות העולם שתפקידו הוא לבצע עבודת מודיעין ע"י טיסה וצילום הקרקע בוידאו. אבי טיפוס מתקדמים של מטוסים

⁴ כגון הסלע הכתום שנמצא ע"י דר' שמידט (Dr. Schmitt) על הירח באפולו 17

⁵ בלועזית המונח המדויק הוא: cognitive fatigue

⁶ או מונח יותר מקובל – חוק היוריסטי (heuristic)

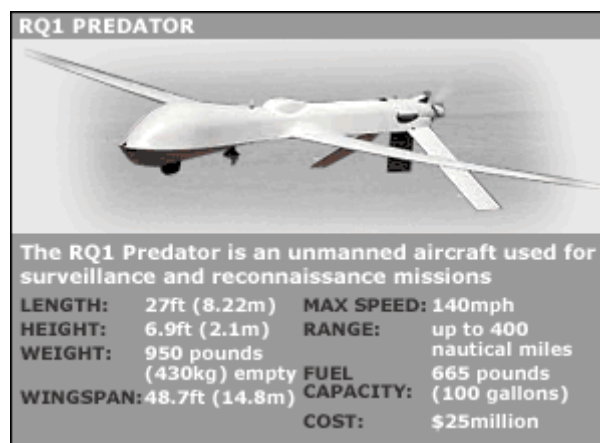
בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



אלה מסוגלים לטוס באופן אוטונומי, אך עדיין המראה ונחיתה הם נושאים שלא אפשריים לבקרה ע"י מחשב המטוס. במקרה של מל"ט ה-Darkstar (מוצג בתמונה 1.3), קיימים מפעילים אנושיים שלוקחים את השליטה במערכת במידה ויש בעיה בעת ההמראה. בעת תכנון המערכת לא נלקחה בחשבון השהיית ה-7 השניות שנוצרה עקב שימוש בלווין כאפיק התקשורת. בדגם הראשון של מל"ט ה-Darkstar אכן היו בעיות בעת ההמראה, אך המפעיל לא קיבל את המידע על כך בזמן והמל"ט התרסק.

חיסרון מעשי נוסף של המערכת הפעלה מרחוק הוא שקיים צורך של לפחות אדם אחד לפחות לתפעול כל פלטפורמה, לעתים קרובות יותר מאדם אחד. דוגמא לך ניתן לראות במל"ט הטורף⁷, כאשר טורף אחד דורש מפעיל אחד לפחות בכדי להטיסו ומפעיל נוסף לפקד על מכשור המודיעין שנמצא על הפלטפורמה. למערכות מל"ט נוספות קיימים צוותים של עד ארבעה מפעילים ובנוסף מפעיל חמישי שמתמחה בהמראות ונחיתות. בד"כ מפעילים אלה עוברים הכשרה במשך מעל שנה לפני שהם מסוגלים להטיס כלי אמיתי. במקרה של מערכות המל"ט, המפעיל מבצע משימות מסוכנות וחשובות ללא כל סכנה אך במחיר גדול בכוח אדם.



תמונה 1.3 – מל"ט הטורף.

⁷ הטורף – Predator הינו מל"ט אשר הופעל ע"י ארה"ב בבוסניה.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



לפי ואמפלר (Wampler)⁸ מערכת הפעלה מרחוק מתאימה ליישומים בהם:

- א. הפעולה אינה מובנית או חוזרת על עצמה.
- ב. לא ניתן להנדס את מרחב העבודה של המשימה כך שיותר השימוש במניפולטורים תעשייתיים.
- ג. בחלקים חשובים מהמשימה יש לסירוגין צורך בפעולות המבוצעות במיומנות גבוהה.
- ד. בחלקים חשובים מהמשימה יש צורך בזיהוי עצמים, ערנות למצבים משתנים או תפיסה מתקדמת אחרת.
- ה. הצרכים של טכנולוגיית התצוגה לא עולים על מגבלות אפיק התקשורת (רוחב פס, השהיות).
- ו. יש אפשרות להעסיק אדם מיומן בהפעלה המערכת.

⁸ Wampler, C., "Teleoperators, Supervisory Control," Concise International Encyclopedia of Robotics: Application and Automation, R. C. Dorf, editor-in-chief, John Wiley and Sons, Inc., 1990, p.997

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

**© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר**



”נוכחות מרחוק” (Telepresence):

בכדי לנסות לפתור את בעיית העייפות ההכרתית הוחלט להוסיף עוד מצלמות עם קצב רענון גבוה יותר. זאת על מנת לנסות ולהרחיב את שדה הראיה ולהפוך את מערכת התצוגה לאופן בו בני אדם מסתכלים על הסביבה. פתרון זה עלול להיות לא מעשי ליישומים רבים בגלל רוחב פס מוגבל. טלפוני וידאו, טלפוני תמונה או ועידות וידאו דרך רשת האינטרנט עם תמונה לא יציבה וחוסר הסנכרון בין התצוגה לעולם האמיתי הן דוגמאות טובות לרוחב פס מוגבל. במקרים אלה, המגבלות הפיזיות על כמות המידע ומהירות העברתו יוצרות מצב בו קצב רענון התמונה נמוך מהקצב שמוח האדם מצפה. התוצאה של רוחב פס מוגבל היא תמונה לא יציבה ועלייה בעייפות ההכרתית. מכאן נובע שהוספת עוד מצלמות בסך הכול מכבידה על הבעיה משום שאנו מוסיפים מידע שצריך לעבור על רוחב פס שהוא ממילא מוגבל.

אזור אחר של מחקר נוכחי עוסק בתחום הנוכחות מרחוק והורדת העייפות ההכרתית ע”י יצירת ממשק משתמש רובוט-מפעיל טבעי יותר למפעיל. נוכחות מרחוק מכווון לנושא שמוכר יותר בשם מציאות מדומה, כאשר למפעיל יש משוב מלא באמצעות חיישנים והוא מרגיש כאילו הוא הרובוט עצמו. דוגמאות: במידה והמפעיל מסיט את ראשו לכיוון מסוים, נקודת המבט של הרובוט משתנה בהתאם. אם המפעיל נותן הוראה לרובוט להתקדם וגלגלי הרובוט מחליקים, המפעיל ירגיש וישמע את המנועים עובדים בזמן שהוא יראה שלא מתבצעת תנועה בפועל. פתרון זה מספק ממשק נוח וטבעי הרבה יותר למפעיל, אך הציווד יקר מאוד ודורש רוחב פס גדול מאוד. בנוסף לכך פתרון זה דורש עדיין מינימום אדם אחד לרובוט. למרות זאת, פתרון זה טוב יותר מ”הפעלה מרחוק” רגילה, אך הדרך ארוכה עד לשליטה של מפעיל אחד ברובוטים רבים.

בקרה חצי-אוטונומית:

חזית מחקר נוספת בהפעלה מרחוק הינה בקרה חצי-אוטונומית, אשר לעיתים נקראת ”בקרה פיקוחית”⁹. בשיטה זו המערכת המרוחקת מקבלת הוראות לבצע פעולה מסוימת שהיא מסוגלת לבצע לבדה. ישנן שתי שיטות עיקריות בבקרה חצי-אוטונומית: ”עזרה רציפה” או ”בקרה שיתופית”¹⁰ ו”סחר בקרה”¹¹.

במערכות עזרה רציפה המפעיל והמערכת המרוחקת חולקים את השליטה. המפעיל מסוגל לבחור האם הוא מעוניין להסמיך את הרובוט לבצע את הפעולה או לבצע לבד בשליטה ישירה. במידה והמפעיל מסמיך את הרובוט לבצע את הפעולה, הוא עדיין צריך לפקח בכדי לוודא שדבר לא משתבש. עניין זה מעשי ביותר עבור רובוטי זרוע בהפעלה מרחוק שפועלים בחלל. המפעיל יכול להרפות מהשליטה (באופן יחסי) בזמן שהזרוע הרובוטית נעה לכיוון נקודת ציון שהוזנה מראש, אך עדיין להיות דרוך במקרה שמשהו

⁹ בלועזית המונח המדויק הוא: supervisory control

¹⁰ continuous assistance או shared control

¹¹ control trading

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף מוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



יִשְׁתַּבֵּשׁ. לאחר מכן, המפעיל יכול לקבל חזרה את השליטה ולבצע את הפעולה המורכבת שדורשת מיומנות גבוהה יותר. בקרה שיתופית עוזרת להימנע ממצב של עייפות הכרתית ע"י כך שהמפעיל מסמיק את הרובוט לבצע עבודות משעממות ומחזוריות באופן עצמאי. בנוסף לכך, בקרה זו מנצלת את יכולת האדם לבצע פעולות רגישות ועדינות. אך למרות הכול, בקרה זו דורשת עדיין רוחב פס גדול.

גישה שונה היא סחר בקרה, שבו האדם מאתחל את הרובוט לבצע פעולה מסוימת באופן עצמאי. המפעיל מתקשר עם הרובוט רק כדי לשלוח פקודות חדשות או להפסיק את פעולתו ולשנות את הפקודות. התכנית הכללית דומה מאוד להורה שנותן לילדו בן ה-10 משימה. ההורה מודע ליכולתו של הילד לבצע דברים באופן עצמאי (לדוגמא: לסדר את החדר). יש להם שפה משותפת (לנקות את החדר אומר לגשת לחדר, להציע את המיטה ולרוקן את הפח). את ההורה לא ממש מעניין באיזה סדר בוצעה פעולת הניקיון (לדוגמא: האם הפח רוקן לפני שהוצעה המיטה). סחר בקרה מניח שהרובוט מסוגל לבצע באופן אוטונומי פעולות מסוימות ללא צורך בבקרה שיתופית. היתרון בכך, באופן תיאורטי, הוא שהמפעיל המקומי יכול לשלוח רובוט למשימה מסוימת, ואז להפנות את תשומת ליבו לרובוט אחר ולתת לו משימה אחרת וכד'. מפעיל יחיד מסוגל לשלוט בכמה רובוטים מכיוון שהם לא דורשים שליטה תמידית בזמן ביצוע הפעולה. בקרה זו אף מורידה את הדרישה לרוחב פס גבוה למצב שבו כמעט אין משמעות לבעיות של שהיות. מידע כגון תמונת וידאו יועבר רק כאשר המפעיל המקומי מסדר את תצורת הרובוט הרחוק לקראת המשימה החדשה ולא כל הזמן. מכיוון שהמפעיל אינו מעורב באופן ישיר בשליטת הרובוט, ההשקעה זמן של 2.5 דקות אינה משמעותית; או שהרובוט הרס את עצמו, או לא. הבעיה עם שיטת בקרה זו, היא שהנחת היסוד היא שהרובוטים מסוגלים לבצע את הפעולה שלהם באופן מושלם גם במצבים בלתי צפויים; דבר שלא בהכרח נכון.

הרובוט Sojourner הציג את שתי השיטות שהוצגו לעיל. במקור הוא תוכנת לפעול סחר בקרה, שבה הגיאולוגים יבחרו סלע, והרובוט ינווט באופן עצמאי קרוב אליו, תוך בחירת מסלול עביר ללא סלעים. למרות זאת, בפועל הובחן כי הגיאולוגים העדיפו להשתמש בבקרה שיתופית, תוך צפייה בכל תנועה. הבעייתיות עם רוב הצורות של בקרה שיתופית היא שהנחת הבסיס היא שהאדם חכם יותר מהרובוט. לרוב דבר זה נכון, אך בד"כ לרובוט המרוחק יש נקודות מבט וזמני תגובה טובים יותר.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא יישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישרין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

**© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר**



בקרת Fuzzy Logic – לוגיקה עמומה:

רקע היסטורי: בשנת 1965 פורסם המאמר "Fuzzy Sets" אשר נכתב ע"י דוקטורנט בשם לוטפי זדה (L.Zaheh). עד לפרסום המאמר, שתי תיאוריות הבקרה ששלטו בתחום היו Classical Control ו-Modern Control. זדה טען כי לוגיקה אינה דבר מוחלט ואין צורך לדון רק במונחים קיצוניים (בוליאניים).

רק לאחר שלוש שנים – בשנת 1968 פותחה תיאורית ה-Fuzzy Logic ע"י קבוצת אנשים אשר הסכימו עם טענותיו של זדה. קבוצה זו הרחיבה ופיתחה את התיאוריה המוצגת במאמר המקורי.

בשנת 1978, הצטרף לקבוצה זו חוקר בשם ממדני (Mamdani), אשר פיתח את תיאורית הלוגיקה העמומה ובנה מערכות עמומות באמצעותם ניתן לייצר מערכות בקרה בצורה פשוטה, מהירה וזולה. ממדני שהיה הודי פיתח את רעיונותיו תוך התבוננות על פועלי בניין שבנו בקתות. מבדיקה שערך גילה שלא חשובה כמות החומר המדויקת שהפועלים מערבבים, כל עוד הכמות היא במידה סבירה, מתקבלת תוצאה טובה.

החל משנה זו מספר החוקרים העוסקים בתיאורית הלוגיקה העמומה גדל באופן משמעותי. מרבית יישומי הלוגיקה העמומה מיושמים היום במערכות בקרה (95%). תחומים נוספים בהם עוסקים בלוגיקה עמומה פרק לבקרה: בתחום הפיננסי (כריית מידע) ובתחום הרפואה (קבלת החלטות רפואיות).

חשוב לציין כי עד היום לא נמצאה דוגמה של בעיה אשר פתירה בלוגיקה עמומה ולא פתירה בלוגיקה סטנדרטית.

כאשר מדברים על "לוגיקה עמומה" הכוונה היא ללוגיקה של "קבוצות עמומות". העמימות מגיעה לידי ביטוי בבחירת הקבוצות שעליהן מבוססת הלוגיקה שאינה עמומה כלל.

יסודות הלוגיקה העמומה: הרעיון הבסיסי בלוגיקה עמומה מבוסס על קבוצה עמומה

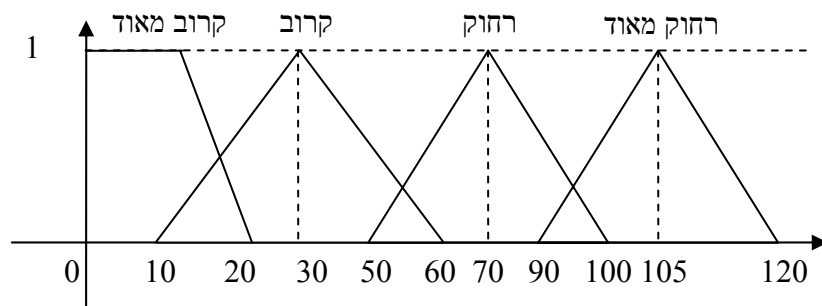
(סט עמום). סט עמום זה אינו סט מדויק (קריספי¹²), ללא גבול קשיח, הכוונה היא שיכול להיות עצם שרמת השייכות שלו לקבוצה אינה מלאה. זאת בניגוד לסט קלאסי שמכיל או לא מכיל אלמנטים באופן קשיח, קרי האם עצם מסוים שייך או לא שייך לקבוצה.

כדוגמה לסט פאזי וסט קלאסי ניתן לראות בהשוואה בין רובוט לאדם בתזוזה ליד קיר. בכדי שהרובוט ינוע במרחק מסוים מהקיר עלינו להגדיר לו את המרחק המדויק (קריספי) מהקיר בסנטימטרים והוא יתקן את עצמו כל הזמן עד שיגיע למרחק זה – אין משמעות למונח קרוב. לעומת זאת, לאדם נוכל פשוט לומר שעליו לנוע קרוב לקיר והוא ידאג לשמור על מרחק זה בערך כל הזמן. כל עוד הוא נמצא בתחום שמוגדר אצלו מראש כקרוב הוא יעמוד בדרישות.

¹² Crisp – ערך קשיח, הכוונה כאן היא האם מתאים או לא מתאים לקבוצה. דרגת השייכות לא יכולה להיות באמצע.



בכדי לייצג את הלוגיקה העמומה באופן כמותי (הגדרה מדויקת של התחום "קרוב") עלינו להשתמש בפונקציות השתייכות (Membership Functions), פונקציות אלה מתארות את רמת "האמונה" שלנו בנכונות דבר מסוים. נמשיך עם הדוגמה הקודמת של הגדרת המונח "קרוב": ניתן לומר כי עבור מרבית האנשים מרחק שקטן מ-10 ס"מ או גדול ממטר אינו כלול במונח זה, אך בתחום זה הדבר אינו מוחלט, שכן 90 ס"מ לא נחשב קרוב כמו 20 ס"מ. נייצג את הנתונים הללו בגרף:

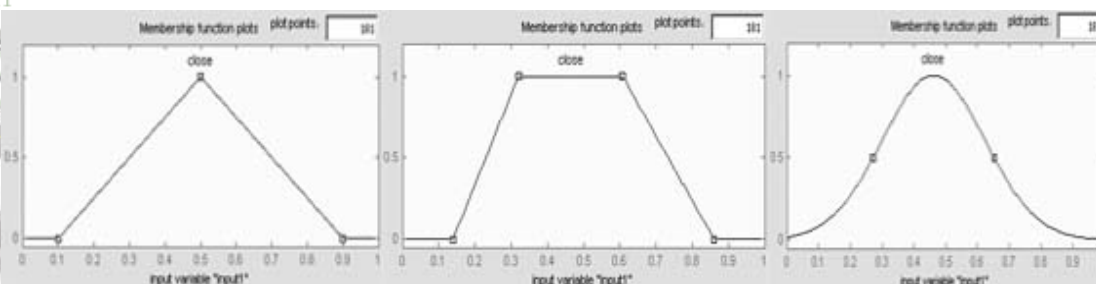


מרחק
(ס"מ)

איור 1.4 – פונקציות חברות עבור הגדרת המונח "קרוב".

הציר האופקי הגרף מייצג את המרחק מהקיר בס"מ ואילו הציר האנכי מייצג את רמת ה"אמונה" שהמרחק הנ"ל קרוב לקיר. כפי שניתן לראות 50 ס"מ מוגדר בתור מרחק קרוב ב"אמונה" מלאה ואילו 10 ס"מ ו-100 ס"מ מוגדרים שנקודות שאינן קרובות כלל (לדוגמה – 10 ס"מ יכול להיות מוגדר ע"י הסימון "קרוב מאוד" ו-100 ס"מ מוגדר ע"י הסימון "רחוק").

הצורה שהוצגה הינה צורת משולש, אך קיימות צורות נוספות לפונקציות השתייכות, דוגמאות לשתי פונקציות חברות נוספות ניתן לראות בתמונה 1.5.



תמונה 1.5 – דוגמאות לסוגי פונקציות חברות.

כוחה של מערכת לוגיקה עמומה נמצא ביכולתה לחבר ביחד מספר פונקציות השתייכות וליצור מערכת של קבוצות שעבור ערכים מסוימים נקבל שתי דרגות שיוך לשתי פונקציות חברות שונות (לדוגמה 90 ס"מ יכול להיות 0.9 "קרוב" ו-0.2 "רחוק") וכך לקבל החלטות בתחומים שמוגדרים "אפורים".

במקרה שמוצג לעיל ניתן לראות יתרון ברור לבקרה עמומה במקרים בהם לא קיים צורך בדיוק מוחלט, שכן במידה ואנו מעוניינים שהרובוט ינוע קרוב לקיר – לא יתנגש בו או יתרחק, ולא חשובה שמירת מרחק מסוימת.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



על מנת לקבל החלטות מדויקות, שכן בסוף על הבקר לשלוח ערך מוחלט למנוע יש צורך ביצירת סט חוקים אשר יורה למערכת כיצד להתנהג במקרים מסוימים. הפורמט הכללי של חוק זה נראה מהצורה "If X is A THEN Y is B", כאשר X – כניסת המערכת, Y – יציאת המערכת, A,B – המשתנים הפאזיים שבעזרת פונקציות החברות ניתן לתרגם לערכי "העולם האמיתי".

דוגמא לחוק עמום המתייחס לדוגמא (בהתייחס לדוגמא לנסיעה לימין הקיר): אם הרובוט קרוב אז הפעל את מנוע שמאל מהר יותר.
מספר הערות:

א. כפי שקיים סט עמום בכניסה, קיים סט עמום ביציאה, שכן עלינו להגדיר בדיוק למה הכוונה ב"מהר יותר".

ב. בעזרת פעולות מסוימות שכאן לא המקום להרחיבם מתבצע החישוב הסופי לקבלת ערך מדויק (תוספת של 3.5V למנוע שמאל). אתייחס לנקודה זו בעת השימוש בבקרה עמומה.

ג. השימוש הנפוץ ביותר של לוגיקה ובקרה עמומה קיים כאשר ישנם מספר קלטים ואז יש צורך לבצע חישוב מורכב בהתייחס לכל קלט, לדוגמא: חיישנים קדמיים, צידיים ואחוריים. שילוב זה נקרא Multi Input Single Output – MISO ומימוש בבקרה קלאסית אפשרי אך מסובך מאוד, לעומת זאת ניתן לממשו באופן פשוט יותר בבקרה עמומה.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישרין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר

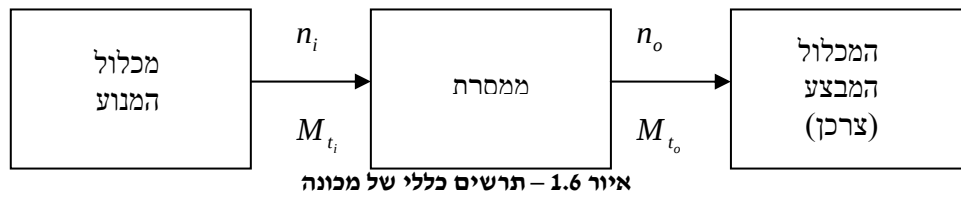


ממסרות מכניות:

תפקידן של ממסרות מכניות:

הממסרות הן מכלולים מכניים שתפקידם להעביר תנועה – בדרך כלל תנועה סיבובית בין המכלולים השונים של המכונה.

באופן כללי אפשר לתאר מכונה כמערכת מורכבת מכמה תת-מערכות (מכלולים), שביניהן קשר תפקודי (איור 1.6). המכלול המבצע (צרכן) מקבל את האנרגיה הדרושה לו ממכלול המנוע באמצעות ממסרת.



תוך העברת התנועה דרך הממסרת משתנים בדרך-כלל המאפיינים שלה: מהירות הסיבוב (n) ומומנט הסיבוב (M_t).

בכניסה: n_i M_{t_i} (input – "i"); ביציאה: n_o M_{t_o} (output – "o").

הסיבות לשימוש בממסרות:

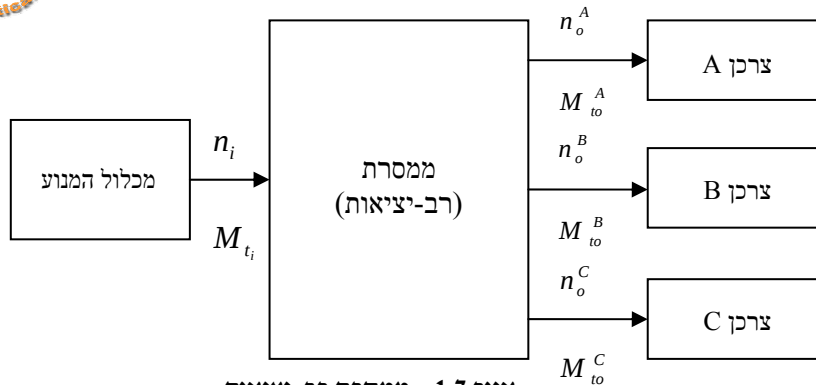
א. חוסר האפשרות לחבר את המנוע חיבור ישיר לחלק המבצע בגלל מגבלות המבנה של המכונה (חוסר מקום), שיקולי נוחיות בהפעלה, שיקולי בטיחות ועוד. הממסרת מעבירה את התנועה ממקום המנוע אל המכלול המבצע.

ב. השוני בין מהירות הסיבוב הדרושה במכלול המבצע לבין מהירות הסיבוב של המנוע. לדוגמא: המנועים החשמליים האסינכרוניים (הנפוצים ביותר) מסוגלים לספק תנועה סיבובית במהירות אחת, קבועה ומוגדרת, מבין מהירויות אלה: 1500, 1000, 750 או 3000 סל"ד; אבל במכלול המבצע דרושות מהירויות אחרות, בהתאם ליעוד המכונה, ובד"כ שונות מהירויות אלה ממהירות המנוע. הממסרת מעבירה אפוא את התנועה תוך שינוי מהירותה והמומנט ביציאה.

ג. הצורך להפעיל כמה צרכנים (מכלולים מבצעים) בעזרת מנוע אחד (איור 1.7). במקרה זה יש לממסרת כניסה אחת וכמה יציאות, בהתאם למספר הצרכנים.

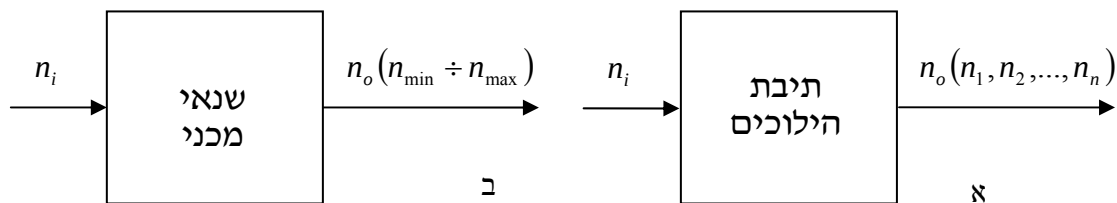
בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישראו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



איור 1.7 – ממסרת רב-יציאות

ד. הצורך בוויסות המהירות. לפעמים חייב המכלול המבצע לעבוד בתנאים שונים, כלומר במהירויות שונות. רבים היום המנועים, המספקים רק מהירות סיבובית אחת, ולכן מווסתים אותה באמצעות ממסרות מתאימות – תיבות הילוכים או שנאים של מהירות (איור 1.8).



איור 1.8 – ויסות המהירות

א. ויסות מדורג – תיבת הילוכים ב. ויסות רציף – שנאי מכני

תיבת ההילוכים מספקת למכלול המבצע סדרה של מהירויות שונות $n_1, n_2, \dots, n_n$, בעוד היא מקבלת בכניסה מן המנוע מהירות אחת בלבד n_i ; ואילו השנאי המכני מאפשר לקבל ביציאה כל מהירות בטווח שבין המהירות המזערית n_{min} לבין המהירות המרבית n_{max} .

ה. הצורך לשנות את אופי התנועה. לדוגמא: כאשר החלק המבצע צריך לקיים תנועה קווית. יש להפוך את התנועה הסיבובית לתנועה קווית באמצעות ממסרת מתאימה.

שנאים מכניים (Variator-Mechanical Variable Speed Drives):

שנאי מכני (ווריאטור) הוא ממסרת בעלת מהירות סיבוב המשתנה באופן רציף ביציאה, אך נשארת קבועה בכניסה (יחס תמסורת משתנה). עקרון הפעולה של שנאים מכניים מבוסס על השימוש בכוחות חיכוך, הנוצרים בין גלגלים, ועל שינוי מידות הקטרים שלהם תוך כדי פעולה.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

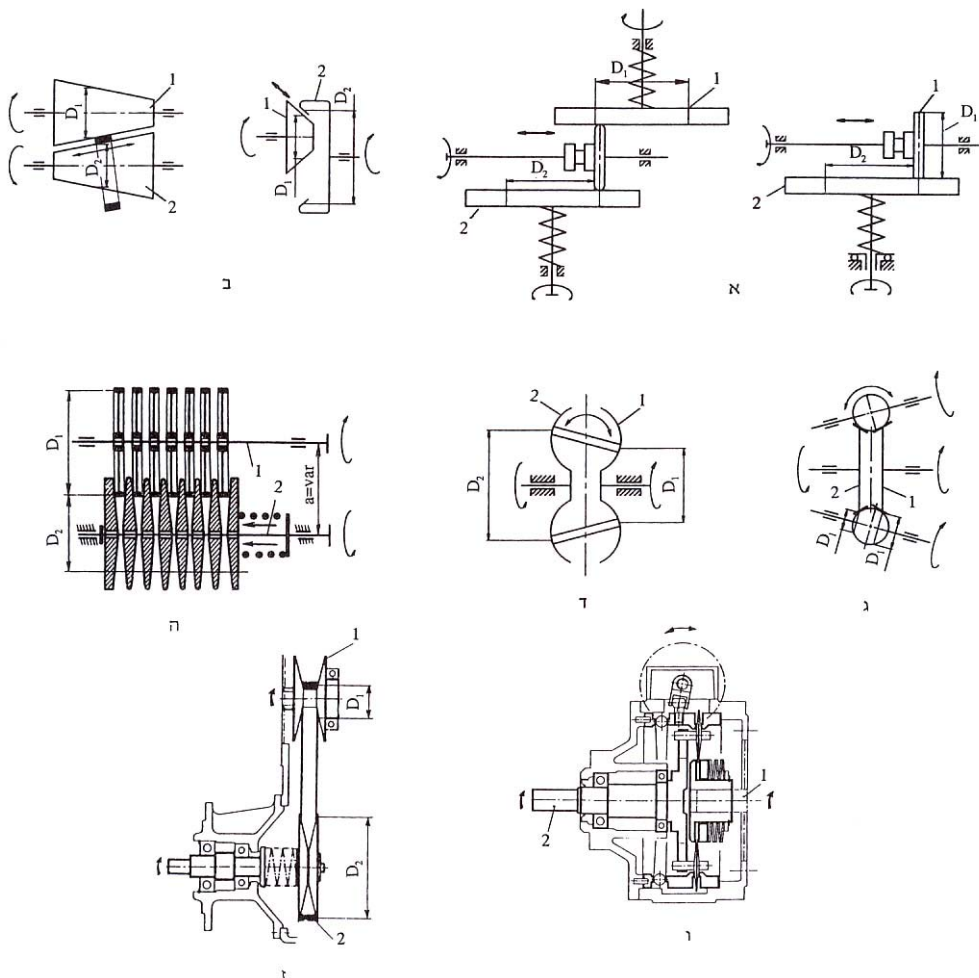
© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



תכונות השנאים המכניים:

- שינוי רציף של מהירות סיבוב תוך כדי עבודה.
- פעולה שקטה ללא תנודות.
- מבנה פשוט וממדים קטנים.
- הגנה נגד עומס-יתר.
- אי-שמירה של מהירות יציאה קבועה עקב החלקה.
- בלאי גלגלים גבוה.
- עומסים גדולים על גלים ומיסבים.
- תחום השימוש:

הספקים: עד $120[kW]$; יחס התמסורת: עד $1:10$



איור 1.9 – תרשימים סכמתיים של שנאים מכניים

- א. גלגלים גליליים. ב. גלגלים קוניים. ג. גלגלים כדוריים. ד. גלגלים טבעתיים.
ה. רב-דיסקות. ו. לווינים. ז. עם רכיב גמיש

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



הסבר לאיור 1.9 א':

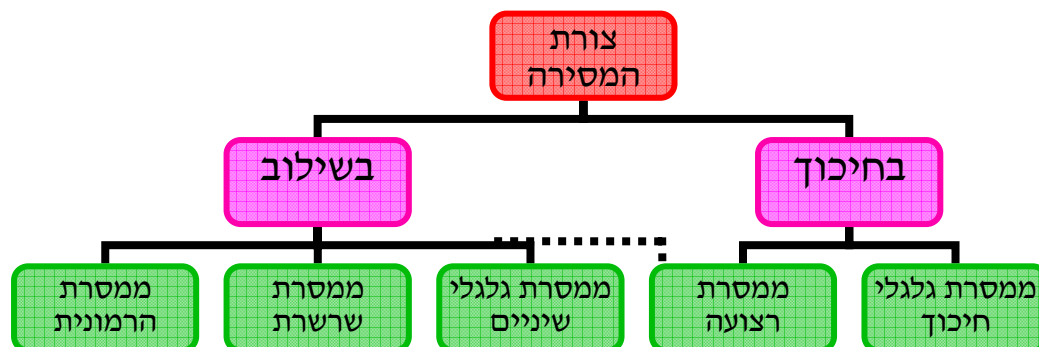
איור זה יוזכר בהמשך הפרויקט ולכן יש צורך בהסבר פעולת המערכת המתוארת בו. הגלגל המניע הינו גלגל מספר 2, הוא מעביר את התנועה בעזרת כוח החיכוך אל גלגל מספר 1 אשר מעביר את התנועה מהמערכת הלאה. יחס התמסורת נקבע ע"י הגדלים D_1, D_2 וניתן לשלוט עליו ולשנותו תוך שינוי המרחק D_2 , כלומר הזזת גלגל מספר 1. מכאן נובע בבירור כי גלגל מספר אחד גם מבצע תנועה סיבובית סביב ציר התנועה שלו וגם תנועה קווית לאורך ציר התנועה שלו (כפי שמצוין בחץ באיור). גלגל מספר 2 אינו זז על ציר התנועה שלו, אלא רק מסתובב סביבו.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

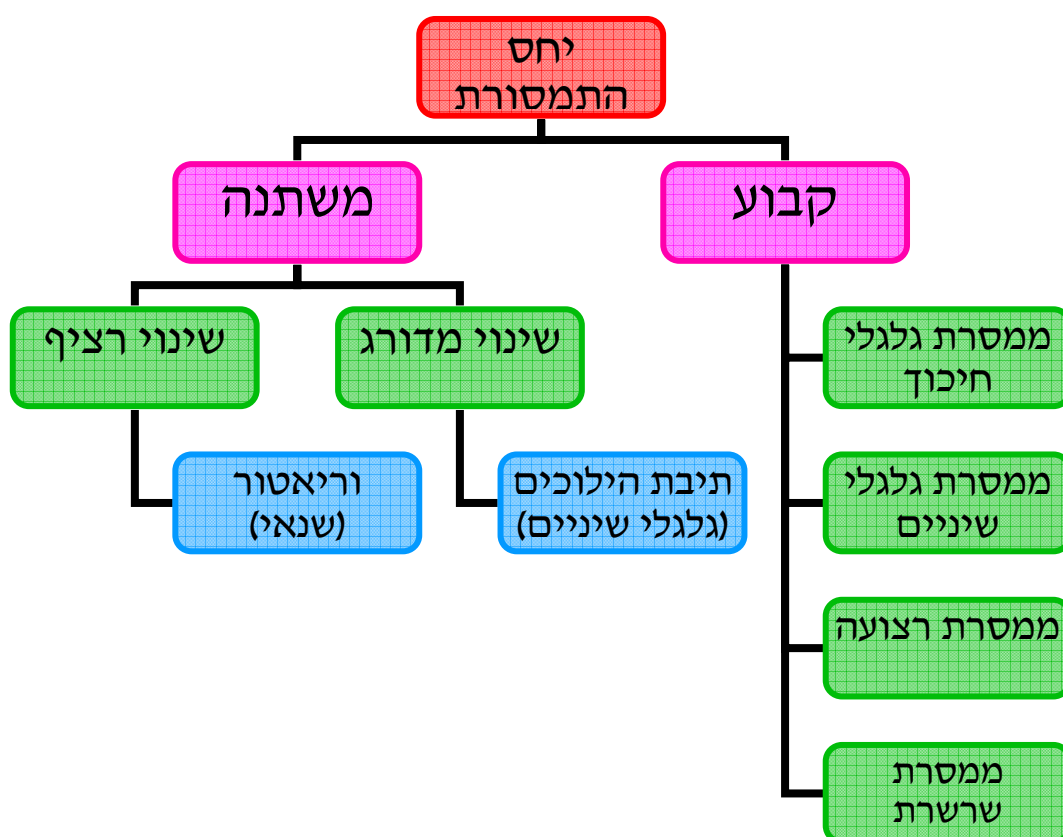
© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



מיון ממסרות:



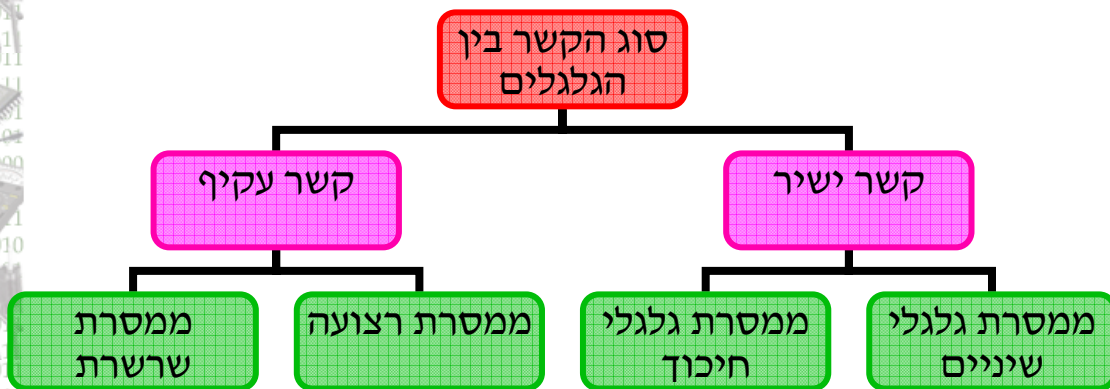
איור 1.9 – מיון ממסרות לפי אופן העברת התנועה



איור 1.10 – מיון ממסרות לפי יחס התמסורת.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



איור 1.11 – מיון ממסרות לפי סוג הקשר בין גלגלי התמסורת.

בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס ולגיא יונה
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר