

אוניברסיטת תל-אביב

רובוטים, חיידקים ועוצמה

סיכום כנס מס' 52

אוגוסט 2010

Robots, Germs and Power

Conference #52, December 22, 2009

סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון

הסדנה הוקמה בשנת 2002 ע"י פרופסור יצחק בן ישראל, בשיתוף עם בית הספר לממשל ולמדיניות ע"ש הרולד הרטוך והתוכנית ללימודי ביטחון, במטרה לעסוק בממשק שבין המדע והטכנולוגיה לביטחון. לשם כך, הסדנה מקיימת סדרה שנתית של כנסים לצד פעילות מחקרית. בין הנושאים בהם עוסקת הסדנה: יחסים בינלאומיים ואסטרטגיה, טילים ונשק מונחה, מדיניות חלל, רובוטים, המרחב המקוון, אנרגיה גרעינית, ביטחון פנים, יחסי הגומלין בין חברה וביטחון, מדיניות בניין הכוח, תהליכי קבלת החלטות ועוד.

Yuval Ne'eman Workshop for Science, Technology and Security

The workshop was launched in 2002 by Professor Isaac Ben-Israel in conjunction with the Harold Hartog School of Policy and Government and the Security Studies Program with the intention of exploring the link among security policy, technology and science. For this reason the workshop holds an annual series of conferences and conducts research. The workshop covers various topics such as international relations and strategy, missiles and guided weapons, robotics, space policy, cyberspace, nuclear energy, homeland security, the interplay between society and security, force build up policy and government decision-making processes.

ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון: פרופסור אלוף (מיל.) יצחק בן ישראל
מנהלת אקדמית, סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון: ד"ר דגנית פייקובסקי
מנהלת סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון: גילי דרוב – היישטיין

חוקרים בסדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון (לפי א"ב): ד"ר חיים אסא, פרופ' יצחק בן ישראל, ד"ר דניאל גולד, טל דקל, ד"ר משה ורד, ליאור טבנסקי, אריק יפעת, רם לוי, אביטל מויאל, ד"ר אביתר מתניה, גדי עברון, ד"ר דגנית פייקובסקי, אורי רכב.

עריכה גרפית: מ. מונטה

הודפס בבית הדפוס של אוניברסיטת תל אביב, ישראל, 2010

© כל הזכויות שמורות. אין להעתיק, לשכפל, לצלם, לתרגם, לאחסן במאגר מידע או להפיץ נייר
עמדה זה או קטעים ממנו בשום צורה ובשום אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני, ללא אישור בכתב,
למעט ציטוט של מובאות מהכתוב לצורכי ביקורת או סקירה.

<http://sectech.tau.ac.il/>

תוכן עניינים

5.....	דבר ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון.....
7.....	מושב ראשון: רובוטים.....
7... 11.....	מפת דרכים ברובוטיקה ביטחונית, תא"ל (מיל.) יעקב נגל, סגן מדעי לראש מפא"ת... לא טוב היות הרובוט לבדו: על עבודת צוות ברובוטים, פרופסור גל א. קמינקא, המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בר-אילן.....
13.....	רובוטים רפואיים, פרופסור משה שוהם, ראש המעבדה לרובוטיקה, הטכניון, חיפה
15.....	שובר שיגרה: מערכות אינטליגנטיות להגנת מתקנים אסטרטגיים, פרופסור שרית קראוס, המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בר-אילן.....
18.....	החיידקים כנחילי רובוטים חכמים, פרופסור אשל בן יעקב, ראש הקתדרה לפיזיקה של מערכות מורכבות, ביה"ס לפיזיקה, אוניברסיטת תל-אביב.....
20.....	מושב ביניים.....
20.....	להיות First - תחרויות רובוטיקה לקידום מצוינות, ערכים ולימודי מדע וטכנולוגיה, תת אלוף (מיל.) אסף אגמון, ראש מכון פישר למחקר אסטרטגי, אוויר וחלל.....
23.....	מושב שני.....
23... 27.....	רובוטיקה – אתגרים טכנולוגיים, אהוד גל, מנכ"ל חברת Defense Vision LTD... כלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מים) – האם הטייס נחוץ במטוס?, פרופסור מחקר דניאל יוס, ראש התוכנית למערכות אוטונומיות, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הטכניון.....
32.....	תנועה בסביבה דינאמית של רכבים אוטונומיים באוויר בים וביבשה, פרופסור צבי שילר, המחלקה להנדסת מכונות ומכטרוניקה, מרכז אוניברסיטאי אריאל.....
35.....	מושב שלישי: סנסורים לרובוטים.....
35.....	ד"ר אלון וולף, ראש המעבדה לבירובוטיקה וביומכניקה, הפקולטה להנדסת מכונות, הטכניון.....
38... 43.....	חיישנים ביולוגיים – ממשק לביוולוגיה, פרופסור יוסי שחם, אוניברסיטת תל אביב... רשתות חיישנים ללא השגחה, סגן אלוף ירון מאירוביץ, רע"ן מערכות משולבות ולוט"ר, מפא"ת.....
47.....	אריה במדבר, פרופסור עירד בן גל, הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת תל אביב.....
51.....	אתגרי ראייה ממוחשבת ברובוטיקה, עפר סלומון, רפא"ל.....

דבר ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון

הטכנולוגיה המודרנית שהרובוטים והסנסורים הם חלק בלתי נפרד ממנה משפיעה על הדרך בה אנו נלחמים, מייצרת הזדמנויות ומציבה אתגרים חדשים בשדה המערכה. רובוטים וסנסורים מאפשרים לדעת ולהבין טוב יותר מהם האיומים הצפויים ומאפשרים לבצע משימות שבעבר לא היה ניתן לבצע.

בכנס, שעיקרי הדברים שנישאו בו מובאים בפרסום זה, ביקשנו בסדנת יובל נאמן, למדע טכנולוגיה וביטחון להצביע על ההזדמנויות והאתגרים שבשילוב רובוטים וסנסורים בלחימה ובפעילות הביטחון השוטפת, לעמוד על כיווני ההתפתחות העתידיים ולדון בדילמות הנגזרות מהם.

קריאה נעימה,

פרופסור יצחק בן ישראל

ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון

מושב ראשון: רובוטים

מפת דרכים ברובוטיקה ביטחונית, תא"ל (מיל.) יעקב נגל, סגן מדעי לראש מפא"ת

בהרצאה זו אציג את "מפת הדרכים" של תחום הרובוטיקה המבוססת על התפיסה של זרוע היבשה ושל מפא"ת. ישנם הבדלים מהותיים בין רובוטיקה יבשתית, אווירית, ימית ותת-ימית, אך יש גם מן המשותף. השוני בין הממדים היבשתיים, האוויריים והימיים הוא שהכתיב את קצב ההתקדמות בשנים האחרונות. מבחינה זו, המימד היבשתי מסובך יותר, אך בשנים האחרונות חל בו שינוי והחלה התקדמות בצה"ל בכל העיסוק בתחום הרובוטיקה היבשתית. במפא"ת מכירים בחשיבות הרובוטיקה היבשתית ולפני מספר שנים הוקם ענף ייעודי לתחום זה. ההחלטה להקימו מעידה על חשיבותו ועל הפוטנציאל הטמון בו עבור מפא"ת. במקביל, פועלת ביחידות המו"פ תוכנית רב שנתית שמתקצבת לחמש שנים.

חזון ועליונות יבשתית - בצד המושגים המוכרים כמו "עליונות אווירית" כדאי להתרגל למושגים דוגמת עליונות יבשתית, בעיקר, לאור לקחי מלחמת לבנון השנייה ומבצע "עופרת יצוקה". על מנת ליצור עליונות יבשתית יש לחבר ביחד ולשלב מספר מכפילי כוח דוגמת ניידות ושרידות כוחות חי"ר. אחת המוטיבציות המרכזיות לקדם את תחום הרובוטיקה היבשתית קשורה בתרומתה הברורה לכל מכפילי הכוח; בעיקר עבור הניידות והשרידות. כלי רכב בלתי מאויש מאפשר ניידות מבלי שיש צורך לסכן ולפיכך גם להגן על אנשי צוות. יתרון כזה מאפשר השקעות פחותות בנפח, במשקל ובמיגון ומספק יכולת אוטונומית מתקדמת ומקום למטע"דים שיסייעו להצלחת המשימה. באשר לשרידות, כלי בלתי מאויש מרחיק את הלוחם מנקודת החיכוך ומקטין את החשיפה שלו לאויב. הסיכונים גם הם משתנים, כלי יבשתי בלתי מאויש זמין למילוי משימה במשך כל היום ויכול לבצע משימות ביום ובלילה. כל זאת מבלי לוותר על דיוק ויעילות במשימה. החזון של מפא"ת בתחום זה הוא לפתח מערכות לחימה מתמרנות בעלות רמות שונות של אוטונומיה ברמת התנועה וברמת המשימה גם יחד. בחזון משולב פיתוח של אבני בניין טכנולוגיות שיאפשר בנייה של המערכת ושל היישומים המבצעיים.

ברמת האוטונומיה, אנחנו פועלים באופן הדרגתי. כל מי שעוסק ברובוטיקה מכיר את שלוש רמות האוטונומיה: החל משליטה מרחוק, עבור באוטונומיה חלקית, וכלה באוטונומיה מלאה. אנו מקיימים גם פעילות ברמת הכלי הבודד, הנחיל הבודד ובעתיד נפתח גם יכולות אוטונומיות לביצוע משימה שלמה, יכולת טכנולוגית שלא קיימת בשלב זה. בחזונו, מערכות אוטונומיות יפעלו בסינרגיה עם מערכות לחימה מאוישות על מנת להגביר את היכולות המבצעיות. מאידך, עדיין ישנן פעולות שהאדם מבצע בצורה טובה יותר מכלי בלתי מאויש.

רובוטיקה ביבשה

קיימים שני תרחישים מבצעיים אפשריים: תרחיש שטח פתוח ותרחיש שטח אורבאני. כמובן, שבפועל שני התרחישים עשויים להשתלב זה בזה. בתרחיש שטח פתוח נתמקד בשלושה תחומים:

- א. פעילות ביטחון שוטף לאורך גדר הגבול.
- ב. פעילות הרובוטים כמשמר קדמי לכוח מתמרן.
- ג. רובוטיקה למשימות כגון פריצת ציר ופריצת מכשול.

תרחיש שטח פתוח - זו הפעילות המבצעית הראשונה שבה נעשה שימוש ברובוט מתמרן. זו משימה מבצעית צנועה אבל מאד קריטית ומצילת חיים. מדובר במשימה פשוטה יותר בהיבט של פיתוח אמל"ח ובהיבט של בניין הכוח גם יחד. רבים סברו שניכשל בתפעול מערכת רובוטית למשימת סיור לאורך הגבול, אך פיתחנו מערכת לביצוע משימות ביטחון שוטף וגבולות לאבטחת מתחמים שפועלת בשלב זה בשתי גזרות בדרום ובצפון. זוהי מערכת מקיפה שכוללת עמדת שליטה (על יותר מכלי אחד), שידור לעמדת פיקוח ויכולת לעבוד בקבוצה. באמצעות המערכת הגענו להישגים מבצעיים מוכחים. המערכת השלימה ניסויי בטיחות מלאים. אחד היתרונות המרכזיים של המערכת הוא שהיא נעה במקומות בהם התמודדנו עם אתגרים בטיחותיים.

בתרחיש שטח פתוח, רובוטים משמשים כמשמר קדמי עבור הכוח המאויש. זוהי משימה מורכבת ומלאת אתגרים, אם ניתן לבצע אותה, ניתן למלא משימות פחות מורכבות שקשורות בלוגיסטיקה קרבית. הכלי הרובוטי מבצע כיום משימות שונות

כגון, איסוף והרכשת מטרות, פתיחת צירים, אבטחה, ביצוע מארבים ולוגיסטיקה קרבית. עדיין ישנן שאלות כבדות בחלק מהמשימות ובסופו של דבר, הוא לא בהכרח יבצע את כל המשימות שמנינו. לדוגמא, פינוי רפואי - יש מי שסבור שפינוי פצוע משדה הקרב על ידי כלי בלתי מאויש היא פעולה שמנגדת למוסכמות שונות. מבחינה טכנולוגית, אנו בשלבי הקמה של אבני הבניין המשותפות כמעט לכל היישומים. זהו אתגר רציני בכל בניית תפיסת ההפעלה המבצעית ובעתיד היא תאפשר יכולת חדשה לזרוע היבשה. בצה"ל ישנו חיבור מוצלח בין ערוץ הפיתוח, לבין הערוץ המבצעי והערוץ התעשייתי. במידה רבה בגלל המבנה של צה"ל – כוח אדם מצומצם הבקיא בתחומים שונים ואנשי מילואים שעוסקים בתחום משיק בחיים האזרחיים.

במפא"ת הגישה היא, שאת הפלטפורמות אפשר לרכוש, אבל מפתחים באופן עצמאי את תתי המערכות הטובות ומשלבים אותן בפלטפורמה. בחרנו במערכות שמבוססות על (Joined Architecture for Unman Systems) JAUS, תקן שמאפשר לנו להוסיף מטענים ובעתיד, לשלב כל פלטפורמה שתתאים לצרכים שלנו. אנחנו מעוניינים שהכלי הבלתי מאויש יוכל להגיע ליעד אליו אנחנו רוצים שיגיע ושיהיה בעל שרידות גבוהה. להלן כמה דוגמאות: דחפור ה-D9 הוא אחד הכלים הראשונים שבנינו בתחום הרובוטיקה. הדחפור פועל בחזית והוא מטרה נוחה וברורה משום שהוא גדול. מהסיבות האלה חשוב שהוא יהיה כלי בלתי מאויש. המשימות שלו הן להיכנס לעומק הקרקע הנדרש ולבצע חישובי מטענים, לפרוץ מכשולים, לתכנן מסלול ולקבוע את עומק הזווית והעוצמה. משימות אופייניות הן פריצת ציר, טיהור זירת מטענים ופריצת מכשולים.

התרחיש האורבאני - חלק מהרובוטים מאופיינים בצורה שונה, אבל יש דמיון בין הכלים. אנחנו מתמקדים בפיתוח מערכות נישאות על ידי החיילים לשדה הקרב. אתגר נוסף הוא כיסוי GPS מוגבל, לטווח העליון ולטווחים תת קרקעיים. במתאר הזה מבדילים בין לוחמת חי"ר אל היעד, על היעד, בתוך היעד וליד היעד. דוגמאות: מערכת ראשונה היא רובוט קטן שיעודו המרכזי הוא לחימה "על היעד" ואין לו יכולת משמעותית להתגבר על מכשולים, משום שצריך לקחת אותו אל היעד. רובוט נישא, הוא רובוט קומפקטי שמשמש ללחימה בתוך מבנים. המפעיל מצביע על היעד שעל הרובוט להגיע אליו (Point and Go Navigation). לרובוט

אין יכולת להתגבר על מכשולים. הרובוט יכול להטיל רובוטים קטנים יותר, כגון כדור "נחום תקום" (Iball) שמצלם בזווית של 360 מעלות. רובוט נוסף הוא רובוט נישא שנושא מטען ומתפוצץ ליד המטרה. שימוש נוסף הוא של רובוט שמשמש כנגד מטענים. בשלב זה מדובר בקונספציה ולא בפיתוח. בשלב זה נבחנת מערכת נשק של חיצים שנורים כנגד מטענים ומדליקים אותם (זוהי מערכת שנמצאת בשלבי פיתוח). טכניקת ההפעלה היא באמצעות רובוט שיכול להיכנס לחדר או למקום גדול, כשהוא מצויד במצלמות וסנסורים. עם זיהוי המטען הרובוט יכול לירות חץ, שמדליק את המטען ומנטרל אותו. כאמור, של בטיחות חשובים מאוד.

במקרים רבים הרובוט נשלח אל משימות שכרוכות בהתמודדות עם מכשולים בדרך אל המטרה. לשם כך, פותח רובוט בעל יכולת טכנולוגית "זחלית" וגלגלית, באמצעותה הרובוט מסוגל לטפס מדרגות ולשבת על ספה. הוא נישא על ידי חייל שמפעיל אותו באמצעות ממשק של Play Station ובאמצעות קסדה שמסייעת לו בניהוג הרובוט. ניתן להשתמש ברובוטים כאלה גם לצורך בקרה, סריקה ומיפוי שטח. תחום פיתוח נוסף, הוא חיקוי של הטבע כגון, פיתוח רובוט "נחשי" שיכול לזחול בנקיקים.

לסיכום, במפא"ת ובצה"ל מפתחים אפשרויות מגוונות של אוטונומיה (חלקית ומלאה); החל ממערכות לפיקוח גבולות, מערכות לחימה גנריות, מערכות נישאות ע"י חיל וכלי צמ"ה (ציוד מכני הנדסי). פיתוח תחום הרובוטיקה נמצא במגמת עלייה עולמית. בתחום המל"טים, הגענו להישגים מרשימים ואנחנו חוזים התפתחות מרשימה בקרוב. בתחום הרובוטיקה היבשתית תחול התקדמות לעבר אוטונומיה מלאה, עבודה בשת"פ ובעיקר, הרחבה למגוון רחב של יישומים. מעל לכל, ניתן להצביע על תרומה מבצעית מובהקת של מתארים בהם אנחנו משלבים מערכות רובוטים ביבשה.

לא טוב היות הרובוט לבדו: על עבודת צוות ברובוטים, פרופסור גל א. קמינקא, המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בר-אילן

יש התפתחויות רבות בתחום האזרחי והצבאי ברובוטיקה. לדוגמה, היום בבתי חולים משתמשים במערכות רובוטיות להעברה של תרופות וממצאי מעבדה. אותן טכנולוגיות לרובוטים המסייעים לפתיחת צירים, משמשות גם לשימושים חקלאיים כגון חפירה וחרישה. כיום יש מספר חברות ישראליות שמובילות בשוק הרובוטי האזרחי, וכמובן מתבצעת פעילות רובוטית צבאית רבה.

אולם, קבוצה של רובוטים יכולה לבצע פעולות שכל רובוט בנפרד לא יכול לבצע. עבודתי עוסקת בתחום שיתוף הפעולה בין רובוטים, בתחומי השוק האזרחי והצבאי. הנושא העיקרי הוא תיאום בין מערכות רובוטיות. לעבודת צוות דרושה הסכמה על מטרה משותפת, תאום בזמן ובמרחב ומניעת התנגשויות. האדם מוכרח להיות חלק מהתהליך בצורה כזו או אחרת; וכיום, אחד האתגרים הגדולים הוא לאפשר למפעיל יחיד לפקח על מספר רובוטים מבלי לשלוט בהם. על מנת לאפשר מעורבות אנושית מינימאלית, המערכות הרובוטיות צריכות להיות יותר אוטונומיות עליהן לדווח ולקבל את הפקודות מהמפעיל.

פריצת הדרך התיאורטית בתחום הגיעה לפני כ-15 שנה על ידי פרופ' שרית קראוס מאוניברסיטת בר-אילן, שכתבה מאמר תיאורטי בו טענה שעבודת צוות היא עניין גנרי וניתן להשתמש בו בתרחישים ויישומים שונים שוב ושוב. ברגע שהובן שדרושה הסכמה הדדית, נפתח הפתח לתחום חדש המתמקד כולו בשאלה הלא-תיאורטית איך עובדים בצוות מבלי להבין על מה עובדים כצוות. זו אפשרה לפתח אלגוריתמיקה חכמה מאוד שניתן למחזר ביישומים שונים מאוד, ולא צריך להתמקד דווקא במשימה ספציפית. על בסיס התובנה הזו, פותחו במעבדה שלי שבאוניברסיטת בר אילן, טכנולוגיות לעבודת צוות גנרית. אלו הודגמו במספר פרויקטים שונים.

הפרויקט הראשון התמקד בתנועה במבנה והוא פותח בסיוע של משרד המדע ושותפים נוספים. מספר רובוטים מבצעים משימה פשוטה, כל אחד מהרובוטים מבצע משימה שנבחרה עבורו. בהמשך הם צריכים לנוע ביחד. רובוט אחד רואה

את הצבע שמורה לו להתחיל ללכת, אבל הידע מופץ לכולם על מנת שילכו יחד. כשהצבע נעלם כולם מפסיקים ללכת. הרובוטים מדברים ביניהם ומחליטים לבד מתי להתחיל ומתי לסיים, אבל רק אחד מהם מקבל את המידע הרלוונטי. הרובוטים מתאמים ביניהם את המשימות כל פעם מחדש וחוזרים בחזרה אל המבנה שנקבע להם. בהמשך מתרחשת "שיחה" דרך הרשת האלחוטית מי יהיה מספר שתיים ומספר שלוש.

פרויקט מאוחר יותר מתמקד בסיור לאורך הגבולות. הפרויקט בוצע בסיוע של משרד הביטחון (מפא"ת) והאקדמיה הישראלית למדעים. פיתחנו אלגוריתם של פטרול ללהקות רובוטים, שאמור להחליף את הפטרול האישי שקיימים בו לא מעט סיכונים. בפרויקט הזה התזמון מובנה והמשמעות היא שכאשר רובוט אחד מגלה מכשול או פרצה בגדר ומתמקד בטיפול בה, הרובוטים האחרים מחליפים אותו. שימור הארגון מתבצע בצורה אוטונומית. בתחומי מחקר רבים, אנו מתמקדים במחשבה על האחר כחבר בצוות ולא רק על היריב.

לסיכום, רובוטים אינם עובדים בואקום ותמיד קיימת אינטראקציה ביניהם. פריצת הדרך שלנו החלה בבר אילן במאמר תיאורטי על עבודת צוות, והמשיכה במחקר אמפירי מקיף שתרגם והרחיב את התיאוריה לשפת המעשה, שלה יש שימושים צבאיים ואזרחיים גם יחד. אוניברסיטת בר-אילן, ובפרט מעבדת הרובוטיקה, נחשבת כיום כאחד המקומות המובילים בתחום, הודות לפיתוחים אלו. העבודה שלנו ממשיכה אל פיתוחים שמתמקדים במחשבה של היריב וכיצד ניתן לתפקד מולו.

רובוטים רפואיים, פרופסור משה שוהם, ראש המעבדה לרובוטיקה, הטכניון, חיפה

לפני שמונה שנים זיהינו את הצורך בפיתוח ושימוש ברובוטים רפואיים. במעבדה לרובוטיקה רפואית בטכניון מפתחים מספר מוצרים מסחריים לחלוטין, שכיום נעזרים בהם בחדרי ניתוח. עבור חלק מן המוצרים, הסתיים שלב הפיתוח, אחרים נמצאים עדיין בשלב פיתוח. מוצרים מסוג שלישי הם בבחינת "מוצרי מדע בדיוני", שייטכן שלעולם לא ייושמו.

כיצד רואים את הרובוטים ברפואה? בעבר, האבחנה הייתה באמצעות חיתוך לתוך הגוף לצורך הכרעה אם דרוש ניתוח. כיום, מבצעים הדמיה (כגון MRI, CT ואולטרא סאונד) ואחר כך מחליטים אם לבצע את הניתוח. החזון שלנו לעתיד הוא לבצע הדמיה, לתכנן את הניתוח במידת הצורך, ולהיעזר ברובוט בביצוע הניתוח, ביכולת גבוהה יותר מזו של יד המנתח. בתחום זה יש שלוש רמות אוטונומיה: רובוטים שעוקבים אחר היד של המנתח וניתן לעשות Scale Down של הכוחות ושל התנועות. רובוטים אחרים, חצי אוטונומיים ורובוטים אוטונומיים לחלוטין. מערכת שקיימת היום לדוגמא, היא רובוט שבמהלך ניתוח מחזיק את המצלמה והמנתח מתקשר אותו באמצעות קול. רובוט בשם דה-וינצ'י של חברת Intuitive Surgical הוא הכי נפוץ כיום. הרופא יושב על יד קונסולה ובאמצעות Remote Manipulator הוא מזיז רובוטים. היתרון המרכזי של רובוט דה וינצ'י הוא שבאמצעות חתכים קטנים מאוד בגוף (בגודל של כ-18 מ"מ), המנתח מרגיש שהיד שלו נמצאת בתוך הגוף. היוזמה לפיתוח הרובוט הגיעה מצבא ארצות הברית שרצה לקדם את היכולת של רופאים בקו החזית, ובמידה ולא ניתן להציב את הרופא בקו החזית, רובוט יוכל להחליף אותו. כיום אנחנו מפרידים את הקשר המידי בין הרופא לבין החולה. המשמעות היא שרופא מומחה יוכל לנתח מספר חולים במספר נקודות בעולם.

במעבדה אילן לרובוטיקה רפואית בטכניון, פיתחנו רובוט הקטן בשני סדרי גודל מרובוטים אחרים קיימים. השתמשנו בו בניתוח גב שבו צריך לאחות שתי חוליות באמצעות שילוב ברגים בכל אחת מהחוליות וחיבור שלהם. שילוב ברגים בחוט השדרה היא פעולה מסוכנת ולכן חשוב שמערכת מדויקת יותר מיד המנתח תבצע

אותה. הרובוט שבנינו, נמצא בצמוד לחוליות ונע עם החולה. באופן זה אנחנו מקבלים את הדיוק המילימטרי שנדרש בניתוח כזה. יש פחות מחמש חברות שמפתחות רובוטים רפואיים כאלה, וביניהן חברת מזור הישראלית.

פרויקטים נוספים: Tip Propel Catheter לביצוע צנתור. בצנתור מסוג מסוים, עדיף להשתמש בקטר קטן שימשוך את הקטטר פנימה. פרויקט נוסף הוא מערכת במימדים מאוד קטנים (קוטר של מ"מ אחד ואורך של 4 מ"מ) שמסוגלת לעלות בתוך צינורות בגדלים של 3-4 מ"מ וגם ללכת בתוך נוזל. אפליקציה נוספת שחושבים עליה במעבדה לרובוטיקה רפואית בטכניון היא לטיפול במקרה שבו אין ניקוז של נוזל המוח וצריך להכניס צינור שמרוקן את נוזל המוח לתוך חלל הבטן. את הניתוחים האלה עושים על פי רוב אצל ילדים ומשום כך בכל תקופה צריך לבצע ניתוח חוזר, משום שהצינור נסתם. מה שנדרש כעת הוא מערכת שתדע לנוע בתוך הצינור ולנקות אותו ותחסוך ניתוחים נוספים.

שובר שיגרה: מערכות אינטליגנטיות להגנת מתקנים אסטרטגיים, פרופסור שרית קראוס, המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בר-אילן

אחת הבעיות המרכזיות בתחום הרובוטיקה היא שאין מספיק רובוטים או כוח אדם לפטרל בכל מקום שאליו היריב יכול להגיע. הגישה הקלאסית היא להגדיל את תכיפות הביקור בכל אחת מהנקודות שבה עובר הסיוור. אולם אנו טוענים שאקראיות בפטרול יכולה להגדיל את ההסתברות שהיריב ייתפס. כיום הרובוטים מסיירים מסביב לגבול בצורה שגרתית. השאלה המרכזית היא איך לבחור את הסתברות התנועה של הרובוטים באופן כזה שיגדיל את ההסתברות לתפוס את היריב, תוך כדי התחשבות בפעולות האפשריות של היריב. בנינו מודל של הבעיה בעזרת שרשראות מרקוב והצענו אלגוריתם פולינומיאלי שהרובוטים יכולים להריץ בצורה מהירה ולהחליט מתי לשנות את התנועה שלהם. הפרויקט הזה התרחב לפטרול לאורך גדר וכן לקיחה בחשבון של הטעויות של הסנסורים של הרובוטים והיכולות של היריב.

פרויקט נוסף מתמקד בהגנה על מצעד. האם אפשר לבחור את השביל של המצעד בצורה כזו שנוכל להציב את השומרים בצורה רנדומאלית ולהגדיל את ההסתברות לתפוס את היריב. בעיה נוספת שאנו מתמקדים בה היא מה קורה אם אין צורך לפרסם את מסלול המצעד או של המטרה שנעה ובמקום זה משתמשים ברנדומיזציה תוך כדי תנועת המצעד.

פרויקט אחר מומש בשדה התעופה בלוס אנג'לס. אנשי הביטחון בשדה פנו אל השותף שלי, מילינד טאמבה מאוניברסיטת דרום קליפורניה וביקשו סיוע בשבירת שיגרה של מיקום בדיקות ביטחוניות בכניסות של שדה התעופה ושל השמת יחידת הכלבנים בטרמינלים השונים בשדה התעופה. בשונה מנתב"ג שבו כל אדם שנכנס אל המתחם נבדק, בלוס אנג'לס יש מספר גדול של כניסות ולא ניתן לבדוק כל אדם. מחקרים פסיכולוגיים מאששים שאנשי ביטחון אינם טובים ברנדומיזציה. לשדה התעופה בלוס אנג'לס יש מספר מאפיינים שצריך לקחת בחשבון: מאפייני מיקום תפיסת היריב ומאפייני מיקום הכניסה שלו. בנוסף, יש יריבים מטיפוסים שונים שצריך לקחתם בחשבון. על מנת להגיע לפתרון אופטימאלי בנינו מודל של שדה התעופה והבעיות איתן מתמודדים אנשי הביטחון בעזרת תורת המשחקים.

המודל לוקח בחשבון את האילוצים ואת התנאים של הסביבה כולל מאפיינים של היום, השבוע והחודש. במקביל פיתחנו אלגוריתם שפותר את המשחק בצורה יעילה. מימוש המודל והאלגוריתם הוביל למערכת שמורה לאנשי הביטחון בכל יום היכן לעשות בידוק בטחוני ולכן לשלוח את הכלבים. המערכת פעילה בשדה התעופה משנת 2007 ובאמצעותה גדל מספר התפיסות של נשק וסמים. עדיין יש מקום לשפר את המערכת ולקחת בחשבון יריבים שלא פועלים בצורה אופטימאלית. במידה והיריב מתמקד בחיפוש הנקודות החלשות מבחינה ביטחונית בשדה התעופה, המערכת שבנינו מאפשרת ללא ספק את ההסתברות הטובה ביותר לתפיסת היריב. אבל רבים מהיריבים לא מתנהגים בצורה רציונאלית ויש להם מידע מוגבל על שדה התעופה והפעילות הביטחונית שנערכת בו. למעשה, למרבית היריבים יש מגבלות חישוביות. השאלה היא האם ניתן לקחת בחשבון את החולשה של היריבים ולהשתמש בה לשיפור האסטרטגיה ההסתברותית בה בחרנו ובכך, להגדיל את ההסתברות לתפוס את היריב. לשם כך צריך לעדכן שני היבטים:

1. בתנאי אי ודאות אנשים נוטים להניח שהסתברות של אירועים מתפלגת בצורה אחידה. רק כשמספר התצפיות גדל, הם מתכנסים להסתברות הנכונה.
 2. היריב לא תמיד מזהה את נקודת החולשה של המערכת.
 - א. אלגוריתם שמתייחס אל היריב כמי שאינו בוחר את הפתרון האופטימאלי (מבחינתו).
 - ב. אלגוריתם שלוקח בחשבון שליריב יש מגבלה על מספר התצפיות שיכול לערוך.
 - ג. אלגוריתם שלוקח בחשבון את שתי האופציות יחד.
- פיתחנו משחק שבו סטודנטים שיחקו בתפקיד אנשי הביטחון ואנחנו את היריב. הראנו שהאלגוריתם השלישי הוא הטוב ביותר, אך אנשי הביטחון סירבו להחלפת האלגוריתם במערכת של שדה התעופה בלוס אנג'לס בגלל שביעות רצונם מהמערכת הקיימת.

References

1. Noa Agmon, Sarit Kraus, Gal A. Kaminka and Vladimir Sadov. Adversarial Uncertainty in Multi-Robot Patrol, Proc of IJCAI 2009.
2. Noa Agmon, Vladimir Sadov, Sarit Kraus, Gal Kaminka. The Impact of Adversarial Knowledge on Adversarial Planning in Perimeter Patrol. In Proceedings of the Seventh International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS-2008). Estoril, Portugal, May 2008.
3. James Pita, Manish Jain, Janusz Maerecki, Fernando Ordsqez, Christopher Portway, Milind Tambe, Craig Western, Praveen Paruchuri and Sarit Kraus. Deployed ARMOR Protection: The Application of a Game Theoretic Model for Security at the Los Angeles International Airport. Proc. of AAMAS 2008 Industrial Track, Estoril, Portugal, May 2008.
4. James Pita, Manish Jain, Fernando Ordonez, Milind Tambe, Sarit Kraus, Reuma Magori-Cohen. Effective Solutions for Real-World Stackelberg Games: When Agents Must Deal with Human Uncertainties, Proc of AAMAS 2009, pp. 369-376.
5. Gerardo Simari, John Dickerson, V.S. Subrahmanian, Sarit Kraus. A Graph-Theoretic Approach to Protect Static and Moving Targets from Adversaries. Proc. of AAMAS 2010.

החיידקים כנחילי רובוטים חכמים, פרופסור אשל בן יעקב, ראש הקתדרה לפיזיקה של מערכות מורכבות, ביה"ס לפיזיקה, אוניברסיטת תל-אביב

לשם פיתוח רובוטים, כדאי ללמוד מהחיידקים, שהם מעין רובוטים טבעיים. לדוגמה: כדוריות דם לבנות שנמצאות בגופנו ותפקידן "לבלוע" חיידקים. הכדוריות והחיידקים מתנהלים כשני רובוטים שכל אחד מהם מבצע מדידה, בוחן את המיקום של השני. למשל כאשר יש שני חיידקים, כל אחד מהם מבצע מדידה של החיידק השני ושל כדורית הדם הלבנה, במטרה לפתח אסטרטגית בריחה. במקביל, כדורית הדם לבנה מפתחת אסטרטגיה של רדיפה. על מנת שהחיידק יוכל לברוח, הוא צריך לדעת למדוד את המיקום ותוך כדי תנועה לשמור את המיקום בזיכרון. התהליך הזה מורכב.

עד היום התייחסו אל החיידקים כאל יצורים פרימיטיביים ביותר חסרי בינה. בפועל, אלו יצורים שמנהלים תקשורת מורכבת, מקבלים החלטות ומעבדים מידע. מספר החיידקים גדול פי 100 מזה של בני האדם בכדור הארץ, והם מתקשרים בינם לבין עצמם. לדרך התקשורת בין החיידקים יש עקרונות. החיידקים משתמשים בכימיקלים כדרך תקשורת ותאום של תנועה, גם מורכבת מאוד, ביניהם. באמצעות כימיקלים מורים החיידקים לחיידקים האחרים להתקרב או להתרחק. החיידקים גם מנהלים משימות. לדוגמה: שני נחילים של חיידקים עורכים בדיקה אופטימאלית של סביבתם ומשום כך, נמנעים ממפגש זה עם זה. במקביל, הם שולחים מסרים כימיים זה לזה.

מפעילות ודרך התקשורת של החיידקים ניתן לבנות מודלים ולתכנן את האינטראקציה שצריכה להיות בין רובוטים בודדים. כל האסטרטגיות שעוסקות באינטליגנציה או תבונה נחילית אינן מצליחות להסביר את כל ההתנהגויות של החיידקים. בנוסף על כך, ישנם חיידקים בעלי מבנה של מעין ירח או בנה שעד היום לא נלקח בחשבון. מבנה כזה מאפשר להם לשנות את כיוון התנועה. מעבר ליכולת של החיידקים לשלוח מסרים, מדי פעם הם שולחים זרועות ונוגעים זה בזה.

בהדמיה של אזור עם מכשולים עבור מספר רובוטים שאין ביניהם תיאום ויש להם מטרה, יארך זמן רב עד שיגיעו אליה, ומרביתם לא יגיעו. מהפעילות החיידקית למדנו כיצד ניתן לייעל את התהליך. באמצעות שלושה אלמנטים ייעלנו את תפקוד הרובוטים בדרכם אל המטרה:

1. כוח של דחייה, שינוי של זווית על מנת לא לעבוד בצפיפות.

2. תנועה במקביל.

3. בהגדרות של רדיוס מסוים, התקרבות, על מנת לא להתרחק.

באמצעות שלושת האלמנטים הללו התנועה נעשתה יעילה יותר. הרובוטים, נעים כקבוצה ומקיימים אינטראקציה קולקטיבית ובמקביל, כל אחד מהם אוטונומי.

אלמנט שאנו מוסיפים הוא מושג בשם "ביטחון מושכל". ברגע שאחד הרובוטים מזהה שהכיוון אליו הם פונים הוא טוב יחסית, הוא הופך למנהיג הקבוצה באופן שבו הוא משפיע יותר מאשר מושפע מהאחרים. יישום של המושג הזה יאפשר לפזר את קבוצת הרובוטים באופן כזה שחלק מהם יהיו רחוקים יותר, יאספו מידע ויתאמו את הקבוצה למסלול הקצר ביותר. אפקט נוסף שהרובוטים יכולים ליישם הוא להתפצל לקבוצות משנה בהתאם לסביבה שבה הם נמצאים. במידה ומאפשרים להם "ביטחון מושכל" במידה גבוהה הם "הולכים עם הראש בקיר", אבל מתקנים את דרכם במהירות, בהתאם לקבוצה. במידה והיינו מציבים את הרובוטים כבודדים, ולא כקבוצה, כמעט ואף אחד מהם לא היה מגיע אל המטרה. בנוסף, רובוטים שיש להם עקמומיות, יכולים לשנות את העקמומיות ולמצוא את הדרך ביעילות רבה יותר. כמו כן, אנחנו מתמקדים בבניית רובוטים שמתנהגים כמו אמבה - לשלוח זרועות, למדוד לכמה כיוונים ולמצוא את הדרך. עם יכולות כאלה, יוכלו הרובוטים להגיע בדרך הקצרה ביותר אל המטרה.

לסיכום, אנחנו מנסים לפתח רובוטים אינטליגנטים בעוד שאחד היתרונות הבולטים של הרובוטים הוא שהם יכולים להיות חפים מטעויות. מאידך, טעויות הן חלק אינהרנטי מהאינטליגנציה ולכן עלינו לפתח רובוטים בעלי גמישות לביצוע טעויות.

מושב ביניים

להיות First - תחרויות רובוטיקה לקידום מצוינות, ערכים ולימודי מדע וטכנולוגיה, תת אלוף (מיל.) אסף אגמון, ראש מכון פישר למחקר אסטרטגי, אוויר וחלל

פרויקט First הוקם לפני 20 שנה על ידי דין קיימן שביקש להתמודד עם הבעיה שבני נוער לא בוחרים במקצועות טכנולוגיים ומדעיים כמסלול מרכזי בלימודיהם. במדינת ישראל לקח על עצמו אביהו בן-נון את הפרויקט לפני 6 שנים. הפרויקט גדול, מורכב ולא פשוט מבחינה כספית, מטרתו היא להגדיל את מספר המדענים והמהנדסים באקדמיה ובתעשייה. בארצות הברית הבינו את החשיבות של המטרה הזו עוד לפנינו. כשאנחנו מגיעים לבתי הספר, אין כ"כ הרבה היענות. תחום הטכנולוגיה אינו "באופנה". אפילו רשת אורט לא ממצבת את עצמה כרשת טכנולוגית, אלא כרשת עיונית. אחת המטרות שלנו בפרויקט היא לגרום לכך שתלמידים מוכשרים יבחרו ללמוד במקצועות הטכנולוגיה כדרך חיים, בכך תלוי עתידה של מדינת ישראל. בארצות הברית היעד של הפרויקט הוא בתי ספר עיוניים לחלוטין. בארץ, החלטנו לפנות לכל בתי הספר ולכל השכבות. בתחום הטכנולוגיה דרושים מהנדסים וטכנאים גם יחד. לשם כך אנחנו משתתפים בשני פרויקטים: תחילה בפרויקט הרובוט הגדול ושנה לאחר מכן הצטרפנו לפרויקט של רובוט העשוי מלגו. לקראת השנה הבאה מתוכנן פיילוט בשיתוף "מדעטק" בחיפה בו נבחן את הכנסת הפרויקט לגני ילדים וכיתות א-ג.

מדי שנה מתקיימת תחרות עולמית באטלנטה. בארץ מתקיימת תחרות מקדימה באצטדיון יד אליהו. שש הקבוצות הזוכות בתחרות נוסעות לאטלנטה והקבוצה הזוכה בתחרות, מוזמנת לפגישה עם נשיא ארה"ב. בארצות הברית יש כ-70,000 מתנדבים בפרויקט ובארץ כבר הגענו לכמה מאות מתנדבים. הבחירה בתחום הרובוטיקה אינה מקרית. התחום הזה נבחר משום שהוא מקצוע רב תחומי שבאמצעותו ניתן לכוון תלמידים לבחור במדע וטכנולוגיה נוספים במגוון תחומים.

משום שמדובר בפרויקט קהילתי, עבודת צוות הינה ערך ראשון, והצוות נמדד גם על פי מידת התרומה לקהילה. לדוגמה, אחד מבתי הספר בחר לקיים חוג רובוטים

בהוספיס של ילדים חולי סרטן בבית החולים רמב"ם, כאשר המבוגרים מסייעים להם בתחומי ידע שחסרים להם. ערך נוסף, מנהיגות – המשתתפים בפרויקט בוחרים מנכ"ל, סמנכ"ל, מנהל כספים, אחראי על תחום האלקטרוניקה ואחראי על תחום המחשוב.

מכיוון שהפרויקט מתקיים כבר 20 שנים, אוניברסיטת ברנדייס עורכת מחקר על התועלת שבפרויקט. במחקר נמצא כי שיעור התלמידים הבוחרים הנדסה כמקצוע לחיים גדול פי ארבע בקרב משתתפי הפרויקט בהשוואה לאוכלוסיית תלמידים דומה ובהתאם גם הפנייה להתנדבות בקהילה.

בישראל, עדיין אין ממצאים תקפים בתחום מכיוון שהמשתתפים בפרויקט מתגייסים לצבא. אך אנחנו יכולים להצביע על כך שהמשתתפים בפרויקט פונים לפרויקטים טכנולוגיים כגון פרויקט "ברקים" בטכניון (MA בהנדסת מכונות ב-4 שנות לימוד). מתוך 15 תלמידים שנבחרו לפרויקט, שישה הם בוגרי First. במהלך הפרויקט מוצמדים לליווי הפרויקט בבתי הספר נציגי צבא, גופים ממשלתיים שמעניקים סיוע בתחום הידע. משום כך הניסיון שנצבר אצל התלמידים בהיכרות עם התעשייה הוא עצום.

איך מתנהלת התחרות? על מנת לעורר אנרגיה, התחרות מתקיימת על מגרש כדורסל. בשבוע הראשון של ינואר מקבלים משתתפי הפרויקט את המשימה, שעל פיה עליהם לבנות רובוט במשך שישה שבועות וחצי. בסוף התקופה נאספים הרובוטים עד למועד התחרות. בשנה שעברה השתתפו בפרויקט קרוב ל-1700 בתי ספר ומעל 42,000 תלמידי תיכון. בכל קבוצה 25 תלמידים. ישנן 42 תחרויות אזוריות ב-39 מדינות בארצות הברית, שני מחוזות בקנדה ותחרות אחת בישראל, התחרות הבינלאומית מתקיימת כאמור באטלנטה. השנה ישתתפו 51 בתי ספר תיכוניים מרחבי הארץ אליהם יצטרפו קבוצות נוספות מחוץ לארץ – אחת מעמק הסיליקון והשנייה מלוס אנג'לס. בנוסף, יצטרפו שתי קבוצות מתורכיה וקבוצה נוספת מבוסניה. שישה צוותים מייצגים את ישראל בתחרות העולמית באטלנטה. ברמת בתי הספר מחטיבות הביניים אנו שואפים להגיע ל-100 קבוצות ולקיים ארבע תחרויות אזוריות בישראל.

בארץ הבינו את חשיבות הפרויקט וגורמים שונים מאמצים את בתי הספר שמשותפים בפרויקט: חיל האוויר אימץ עשרה בתי ספר, חיל המודיעין אימץ שלושה וחיל הים את בית הספר ימין אורד, שזכה פעמיים. הטכניון מעניק מלגות לסטודנטים שמשמשים כמאמנים בפרויקט, ובנק לאומי תרם מיליון וחצי דולר להקמת מרכז להוראת הרובוטיקה בטכניון, בו מכשירים מורים בקורסים המוכרים לגמול השתלמות.

אימצנו מודל מצליח בארה"ב וע"י הצטרפות אליו הצלחנו לגדול במשך שש שנים מ-12 בתי ספר תיכוניים בשנת 2005 ל-51 בשנת 2010 ומ-18 קבוצות בחטיבות ביניים ל-93 קבוצות השנה. זו דוגמה להתגייסות של התעשייה, הקהילה העסקית, האקדמיה ואנשים שמבינים את חשיבות יצירת דור העתיד של מדינת ישראל בתחום הטכנולוגי תוך מתן דגש על מעורבות ותרומה לקהילה.

מושב שני

רובוטיקה – אתגרים טכנולוגיים, אהוד גל, מנכ"ל חברת Defense Vision LTD.

בהרצאה אציג את המנועים שמניעים את הרובוטיקה בעולם ואת הערך המוסף של מדינת ישראל בתחום ולבסוף, אציג מספר המלצות להמשך, על מנת לנצל את הערך המוסף של ישראל בתחום. הזוג טופלר בספרם "מלחמה ואנטי מלחמה" הגדירו את הגל הראשון שנמשך כמה אלפי שנים והתאפיין בחקלאות. בגל הזה כלי הנשק היו חץ וקשת. הגל השני התאפיין בתעשייה, כלי הנשק היו הטנק, המטוס והתותח. היום אנחנו נמצאים בגל השלישי, עידן המידע. להערכתי, גל זה ימשך זמן רב.

בעשור האחרון היו פריצות דרך בתחומי המחשוב, פלטפורמות ניווט, ראיית לילה, ראייה בכל מזג אוויר. אתגרים שעומדים בפנינו הם בתחומי האוטונומיה, סנסורים, תקשורת על צבירים, מקורות אנרגיה מזעור מחירים.

מבט על שוק הביטחון - פרויקט ה-FCS (Future Combat Systems) שהיה הפרויקט הגדול ביותר, הוביל את הרובוטיקה בעולם. הושקעו בו למעלה מ-200 מיליארד דולר, אך הוא נעצר בגלל בעיות תקציביות בארה"ב. פרויקט ה-FCS היה הגוף הגדול ביותר שעסק בפלטפורמות יבשתיות. חשוב להבין שככל הנראה ישנם כוחות גדולים יותר מאלה של ישראל לפיתוח פלטפורמות. ולכן, לא נכון לפנות בישראל לפיתוח פלטפורמות גדולות. לדוגמה, בפיתוח ג'יפ דרושות 5 עד 10 שנים של השקעה על מנת שמשרד הביטחון יתחייב לקנות 200 ג'יפים. במקום זה, חשוב להציב את כוח האדם האיכותי בנקודת עבודה שבה יוכל להתמודד בעתיד עם השוק המסחרי. לישראל אין נפח של צרכנים. לעומת זאת, כשהצבא האמריקאי, הסיני או השוק האירופאי המאוחד מחליטים לפתח מטוס או פלטפורמה כלשהיא, הם לא זקוקים שירכשו מהם, משום שהם בעצמם רוכשים את הפלטפורמות שהם מפתחים ובכמויות גדולות. היתרון היחסי שלנו בתחום הוא עבודה בפלטפורמות קטנות-בינוניות עם מסה גדולה של משאבים.

מיליון רובוטים כבר נמצאים היום בשוק. קצב הצמיחה עד לשנת 2025 מוערך בכ- 70 מיליארד דולר. השליטה המרכזית בתחום היא של יפן. במשך כמה עשורים תמכנו בפיתוח של מכונות חישוב ומעבדים. אלתא הובילה פיתוח של מספר מעבדים שהביאו לפריצת דרך ביישומים שונים בעולם. לאבולוציה לקח 60 מיליון שנים להתפתח, ב-2010 כוח החישוב שלנו הגיע קרוב מאד לכוח החישוב של קוף. למוח האנושי יש יכולת לבצע 20 מיליון פעולות בשנייה. על פי NASA ב-2010 המחשבים שלנו מבצעים 20 ביליון פעולות בשנייה ובשנת 2030 מחשב אחד יגיע לרמת CPU של עיר שלמה. גם אם הנתונים האלה מוגזמים הם מעידים על כך שכושר החישוב של המחשב גדול יותר מכושר החישוב האנושי.

פלטפורמות - הצבא האמריקאי קיבל החלטה שבשנת 2014 הוא יצטייד ב-1700 פלטפורמות ניהול. כל פלטפורמה שוקלת בין 2 וחצי טון ל-3 וחצי טון. פלטפורמות נוספות הן ה"מיול" וה- IRobot שהעלויות שלהן יקרות מאוד. הערך המוסף של ישראל אינו נמצא בפלטפורמות גדולות. לעומת זאת אנחנו טובים בתחום האוויוניקה – מערכות שמציבים על מערכות אביוניות, מערכות שמציבים על טנקים וייתכן שכדאי לנו להתפתח בתחום המערכות שמוצבות על גבי רובוטים.

ב-DARPA פרסמו מסמך שנכתב על ידי צוות של אנשים שהגדירו משימות מוגבלות לרובוטים בעשורים הקרובים. במסמך יש מיפוי של שלושים ושתיים משימות. מה שמאפיין את המשימות הן לוגיטיקה פשוטה. במסמך המשימות נקבע סדר עדיפויות: בין היתר, ארבעה רובוטים שיוכלו להיכנס לסביבה מסובכת, ועל גבי המערכת הזו יותקן כלי נשק. למערכת ה"מיול" עשו Down Size ובנו כלי קטן והחליטו לתת אותו ל-IRobot. הפלטפורמה די דומה, למרות שהיא שוקלת רק 15 קילוגרם. עדיין, היא אמורה להיות עם ראייה סטריאוסקופית ואדם בחוג ינהג אותה. לכל אלה שעוסקים בפרקטיקה ורוצים לראות בשנים הקרובות מערכות עובדות בשטח, מומלץ לאמץ את הראיה הסטריאוסקופית בטווחים הקצרים. בטווחים ארוכים יותר יש בעיה. לעין האנושית יש קושי לראות עומק, ולכן, הפתרון המוביל בעולם הוא הלייזר רדאר יחד עם Stereo vision. לייזר רדאר הוא מעין מכ"ם שמוציא טווח לכל נקודה בתמונה. הוא מזהה עומקים שניתן לנהג בהם. הלייזר רדאר (לדאר) לא מספק תמונה טובה בעננים, ערפל ובעשן. לכן מחליפים לגלים מילימטרים, ומוציאים תמונת מכ"ם עם הטווחים שניתן לנהג

באמצעותם. העלויות של הלהדאר יקרות. להדאר קטן ששוקל מאתיים קילו, עולה בין 6,000 ל-10,000 דולר. ייתכן שניתן לייצר אותו על צ'יפ אחד בעלויות של עשרות דולרים.

בתחום הצבירים חשוב שגופים שונים יעסקו בפיתוח התחום. הצביר שלנו מורכב מזוג רובוטים או מרביעייה ומבצע משימות מוגבלות. בתחום התקשורת הדרג הלוחם מבין שזו אחת מהבעיות המרכזיות שיש לנו. בעבר, הסתפקנו במכשיר קשר בין חיילים. היום, מעוניינים לאפשר וידאו עבור כל חייל. תחום התקשורת צריך לקבל קשב בראייה לאומית משום שכיום כל אחד עובד בנפרד ו"קופצים" ממערכת למערכת. חשוב לדון בפתרון בעיית התקשורת ברמה הלאומית. חלק חושבים שהאוטונומיה תפתור חלק גדול מהסוגיה, אני לא צופה שזה יקרה בשנים הקרובות.

מקורות אנרגיה - בשני העשורים האחרונים, הצבירה בסוללות גדלה פי חמש. בתחום הטלפוניה הסלולארית מעוניינים בכמה שיותר אנרגיה בכמה שפחות מקום. וגם התעשייה של כלי הרכב החשמליים מובילה את התחום. בתחום הזה, לגופים רבים יש מוטיבציה לפיתוח. על גבי ה"מיול" יש סוללות ב-25 אלף דולר. היום, התפרסמה ידיעה ב"כלכליסט" על פיה יצרני הרכב החשמלי ייצרו כלי רכב חשמליים שמשקל הסוללה שלהם הוא בין 100 ל-150 קילו ויספיקו למרחק של 200 קילומטר. אם מפעילים את המזגן, ניתן לנסוע כ-60 קילומטר.

לסיכום, ייתכן והגל הרביעי הוא הרובוטיקה שתתעסק בחלל, בגנטיקה וכמעט בכל דבר. תחומי הפעילות נראים כאין סופיים. חשוב שבמערכת הביטחון ננסה לכוון את התעשייה אל תחומים שיביאו תועלת רבה יותר. פעם אחת עבור הצרכים של מערכת הביטחון, ופעם נוספת בראייה לאומית ונבחן במה נכון להתמקד.

תחום האוטונומיה, אם נדע לפתח מערכות סנסורים, הוא נקודת עבודה מצוינת, משום שיש הרבה אלגוריתמים שבהם יש לנו יתרון יחסי גבוה. בתחום התקשורת כאמור חייבים להגיע לפתרון בראייה לאומית. בתחום מקורות האנרגיה, ככל הנראה נסתייע באחרים.

מיזעור - הפחתת המחירים המרכזית שניתן לעשות היא ברמת התכנון. בקבוצה החדשה שאיתה אני עובד, אנו מפתחים פלטפורמות קטנות ומתקדמות ומקדישים זמן ארוך יותר לתכנון ממה שהקדשנו בעבר. כשעושים תכנון נכון, הפיתוח יארוך זמן רב יותר, אבל בפעם הבאה שנייצר את המוצר הוא יהיה קרוב יותר למוצר הסופי שנרצה לראות.

כלי טיס בלתי מאוישים (כטב"מים) – האם הטייס נחוץ במטוס?, פרופסור מחקר דניאל ויס, ראש התוכנית למערכות אוטונומיות, הפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל, הטכניון

הסדרה הראשונה של כלים אוטונומיים בארץ היו כלי טייס בלתי מאוישים כבר החל מסוף שנות ה-60 של המאה הקודמת. השאלה כיום היא האם עדיין יש צורך בטייס? האם ישנה נקודה שבה היכולת הרובוטית עוברת את היכולת של האדם? קורצוויל נתן מספר מדויק למדי, כאשר ניבא כי בסביבות 2015 יומצא הרובוט הראשון שיוכל לחשוב מהר יותר מן אדם.

ארצה להציג שתי דוגמאות שבהן אי אפשר לשים טייס במטוס. דוגמא ראשונה, מטוס "המוסקיטו" של התעשייה האווירית, שהוא קטן מידי מבחינה פיזית על מנת להכניס אליו טייס (מוטת כנף של פחות מ-30 ס"מ) ועדיין לא ניתן למזער אנשים. דוגמא שנייה, כלי נוסף, מטוס ענק, בעל הכינוי "לווין לעניים", מונע על אנרגיה סולרית, קל מאוד וגמיש אשר מושפע מאוד על ידי הרוח. הסיבה שאדם אינו מתאים לטיסה בכלי זה היא כי הכלי אינו נוחת, הוא בנוי להישאר זמן רב באוויר (שבועות ואף יותר), ומסוגל להעביר אינפורמציה מהאוויר ואין לו צורך בנחיתה. אדם, אשר יהיה בתוך הכלי לא יוכל לעמוד בשהות הארוכה ללא ירידה לקרקע.

היסטוריית המטוסים הראשונים ללא טייס החלה עוד לפני שהחלו לפעול כלי הטייס עם טייסים. האוסטרים הפעילו בלונים ב-1849 במלחמה נגד הרוסים. בצה"ל הכלי הראשון נקרא מב"ט, מטוס בלי טייס, "הצ'וקאר", מטרה מעופפת שנרכשה בסוף שנות השישים. מיד לאחר מלחמת יום כיפור התקבלה החלטה במפא"ת לנסות לבדוק האם אפשר לייצר כלי טייס בלתי מאוישים. הוחלט לעבוד על המזל"טים, מטוסים זעירים ללא טייס. הכלי הראשון שפותח, "בז-רן", נועד לחיל המודיעין ופותח על ידי חברת תדיראן ולא דווקא על ידי התעשייה האווירית. אחת הסיבות לעיכוב הארוך בפיתוח כלים לא מאוישים הייתה התנגדות ראשונית של חילות האוויר בעולם. רק לאחר שחיל המודיעין הראה בשנות ה-70 שניתן להפעיל אותם, הרעיון התקבל. הרעיון שמטוסים ללא טייס יוכלו לעשות את כל המשימות ויחליפו טוטלית את המטוסים המאוישים היה שגוי בשנות ה-70 וכיום הוא נראה ריאלי יותר, אך עדיין לא בעתיד הקרוב.

המעבר בשם, ממטוסים ללא טייס, לכלי טייס בלתי מאוישים איננו סמנטי בלבד. המל"טים הראשונים נהגו מהקרקע עם מעין ג'ויסטיק. ניתן לומר כי המעבר ממל"ט לכטב"ם מייצג את המעבר מניהוג מרחוק, למפעיל אנושי שהוא אופציונאלי. כיום יש יכולות משופרות במערכות הבקרה, ניהוג ושליטה, יכולות חישוב ורמת האוטונומיה האפשרית. כמו כן, האפשרות להרחבת תחומי כלי הטייס-כדוגמת כטב"מים מנפנפים דמויי ציפורים מלאכותיות וחרקים פותח תחום שלם של העתקה מהטבע. אלטרנטיבה נוספת היא שימוש בטבע, חיבור מערכת אלקטרונית למוח של חיה. כיום, עובדים עם חרקים בכון זה.

מאחר ואין טייס אנושי, יש להגדיר את האוטונומיה. כמו כן, במקום מוח אנושי יש צורך במחשב ושיכול לעבוד במהירות, יהיה בעל זיכרון, תהליכי חשיבה עצמאיים ולמידה. קבלת ההחלטות היא סוג של אלגוריתם למחשב. הצד הבא הוא שיפור האלגוריתמים. כרגע, האלגוריתמים הקיימים פרימיטיביים באופן יחסי לאדם. אצל בעלי החיים יש תופעה שנקראת אינסטינקטים והתרגום מבחינה מדעית הוא – RISC-reduced instructions programming. אינסטינקט הוא מצב שהחיה או המערכת שלנו לצורך העניין, תדע שברגע שהם מתרחשים יש לבצע פעולות מסוימות אוטומטית, ללא שיקול נוסף. לדוגמא, נגעת במשהו חם יש להזיז את היד באופן מיידי, אין צורך לחשוב כמה חם והאם זה טוב או רע לי, יש להזיז את היד לפני שנקבל כוויה. יותר מזה- נשימה למשל, נעשית ללא חשיבה אקטיבית. ברגע שמגדירים פעולות כאלה, המתארות סיכונים ופעולות סטנדרטיות אחרות כמיידיות, נוכל לקצר את הזמן בו מחשב יוכל לעשות את החשיבה וניתוח מצבים הכוללים דברים נוספים.

בנקודה זו מתעוררות בעיות אתיות כגון קבלת אחריות על החלטות שגויות של הרובוטים האוטונומיים. מי האשם במקרה של החלטה שגויה, האם היצרן שהביא לפגם בתכנות או שמא מי ששלח אותו? האם חוקי המלחמה תקפים גם כאשר הלוחמים אינם אנושיים? דילמה נוספת היא ארגוני עובדים ומקבלי החלטות אשר מתנגדים להכנסה של כלים לא מאוישים, אשר יכולים לנשל אנשים רבים מעבודתם.

דילמה אחרונה, הנושא של עצמאות יתר. האם נגיע למצב שבו הרובוט יפנה גגדנו? על מנת להבין את הבעייתיות בכך יש להגדיר מהי מערכת אוטונומית. ההגדרה היא שמערכת אוטונומית היא מערכת שיכולה להתאים את עצמה כדי לבצע את המשימות שלה תוך פעולה בסביבה משתנה וקיום אירועים לא צפויים. מערכות אוטונומיות יחליפו בני אדם בצורה טובה בעבודות משעממות כדוגמת חלוקת דואר, פעולות מלוכלכות, פעולות מסוכנות בעיקר במערכות הביטחוניות ובמערכות מסובכות כדוגמת בקרת התעופה באזור שדות תעופה.

ישנם מספר סוגים של מערכות כטב"מ. מערכות חישה: אופטיות, אקוסטיות, אינפרא-אדום, לייזר ועוד, מערכות ניתוח מצב: מחשבים, מערכת קבלת החלטות באופן משותף וביצוע ההחלטה: תמרון, שינוי מטרה, תקיפה ועוד. יכול להיות שבצורות שונות מדובר על צביר של רובוטים. הצביר יכול להיות דמוקרטי בו מתנהגים על פי הרוב, או מערכת היררכית.

קיימות חמש רמות של אוטונומיה. המערכת הנמוכה ביותר היא ביצוע עצמאי של פעולות מוגדרות מראש. לדוגמה, ברגע שהמזגן בבית נדלק הוא הופך למערכת אוטונומית ברמה הנמוכה ביותר. כאשר המזגן מגיע לטמפרטורה הרצויה הוא מפסיק לעבוד ונדלק שוב כשיש צורך. הרמה השנייה היא בפעולות קצת יותר מורכבות, אך עדיין קיימת בקרה מתמדת. לדוגמה בקרת שיוט במכונית, שומרת על מהירות גם בתנאים של כביש מורכב. בסופו של דבר מערכות שמסוגלות לבצע משימות שלמות תחת פיקוח וביצוע עצמאי לחלוטין של משימות מורכבות וגם כמערכת עצמאית לחלוטין בשיתוף עם אחרות. הרמה השלישית היא עצמאות בביצוע של משימות שלמות תחת פיקוח. הרמה הרביעית היא ביצוע עצמאי לחלוטין של משימות מורכבות ואילו הרמה החמישית היא מערכת עצמאית לחלוטין בשיתוף עם אחרות. כיום אנחנו נמצאים בין שלב שלוש לארבע, לפי הדרג של האמריקאים. ניתן לראות שמאז שנות ה-50, שבהן החלו להתפתח כלי הטייס הבלתי מאוישים יש עלייה בשיפור רמת האוטונומיה של אותם כלים. מאמצע שנות ה-80 שבה היינו בין רמה 1 ל-2, שבה הכלי מונהג מרחוק ודיאגנוזה מועטת של החלטות, יש עלייה מאסיבית. כיום, ב-2010 אנחנו נמצאים ברמה 3, בה הרובוט בעל יכולות עצמאיות ויש אפילו קואורדינציה של קבוצות צבירים קטנים. התוכנית

לעתיד היא להגיע לפיזור כמעט מלא ואוטונומיות כמעט מלאות עד שנת 2025. השאלה היא מה הכיוון העתידי שלנו בתחום.

יש כיום בעיה גדולה של כטב"מים בשילוב במרחב האווירי האזרחי. כל עוד בנושא הצבאי ניתן להגיע להחלטות מהירות, כל תאונה או תקלה היא באחריות צבאית. הבעיה היא כאשר אנחנו מתחילים לטשטש את הגבול ומערבים את השימוש האזרחי. כאשר השימוש הוא אפילו אזרחי למחצה כגון שימושים משטרתיים או של ביטחון פנים מתעוררות בעיות אחרות לגמרי כגון יתירות הבטיחות של הכלי, האחריות הפלילית והאזרחית וכמובן הבעיה הפסיכולוגית. לדוגמא, האם ניתן להטיס מטוס נוסעים אזרחי ללא טייס אנושי. במידה וזה אפשרי, האם יהיו האנשים מוכנים לעלות על טיסה כזו.

בשנות הארבעים היו 6 אנשי צוות אוויר בקוקפיט של מטוס אזרחי מאויש. היום נדרשים שני אנשים בלבד. ניתן היה להטיס את המטוס עם טייס אחד בלבד, אך בדיון של רשות תעופה האזרחית העלו שאכן ניתן לטוס עם טייס יחיד, אך צריך להוסיף לו כלב, כדי שהכלב ינבח כאשר הטייס יירדם ויזכיר לו שהוא צריך לטוס ולהנחית את המטוס.

לסיכום: יתרונות הכטב"מ הוא קודם כל בגודלו. ככל שהאוטונומיה תגדל יגדלו משך השהייה ויכולות התמרון. כיום המגבלה על יכולות תמרון במטוסי קרב אינה נובעת מטכנולוגיה, המגבלה היא הטייס. טייס אנושי לא יכול לסבול ג'י מעל 8-9 רצוף. מטוס או כל טיל יכול לתמרן ב-25-30 ג'י שזה אומר רדיוס פנייה פי 3 יותר קטן מאשר למטוס. מעבר לזה, כשמדובר על משימות ספציפיות לישראל היתרון הגדול ביותר הוא מניעת סיכון חיי אדם ושבי.

חסרונות הכטב"מ הן ברמת העצמאות ויכולת התגובה המהירה כשיש צורך בקבלת החלטות מהירה. כמו כן, יכולת האלתור שיש לבני אדם היא תכונה שמדעני מחשב עדיין לא הצליחו לתכנת באלגוריתמים למרות הניסיונות בכיוון של היגיון מעומם. לא כל החלטה צריכה להתקבל בצורה סכמטית לפי נוהל מסוים ולעיתים ההחלטות הנכונות מתקבלות כאלתור או אינטואיציה. מבחינת גודל המחשב ומהירות החישוב, יהיו ב-3-4 השנים הקרובות מחשבים בעלי יכולות של

בן אדם. תחזית נאס"א לכטב"מים ב-2025 היא הנעה חשמלית ותאי דלק. משטחי היגוי של חומרים בעלי זיכרון, כלומר משטחים חכמים, חומרים ביו-מימטיים וכדומה.

תנועה בסביבה דינאמית של רכבים אוטונומיים באוויר בים וביבשה, פרופסור צבי שילר, המחלקה להנדסת מכונות ומכטרוניקה, מרכז אוניברסיטאי אריאל

השאלה שאעסוק בה היא כיצד לתרגם פעולות פשוטות של קבלת החלטות לאלגוריתמים שיאפשרו הנעת הרובוטים בצורה בטוחה ויעילה. לפני כ-25 שנה המרכיבים החשובים בתחום זה היו בקרה ומתמטיקה ואילו היום המרכיבים העיקריים הם דינאמיקה ותכנון תנועה. ההתייחסות לסביבה דינאמית היא בהקשר של מכשולים משתנים שיכולים לשנות צורה או מיקום. מכשולים דינאמיים יכולים להיות רכבים על הכביש, ספינות בים, גלים, מטוסים באוויר וכן הלאה. במקרה זה הגדרת היעד אינה מספיקה ויש צורך בהגדרה נוספת של מהירות התנועה תוך התחשבות במכשולים ותנאי סביבה. כמו כן, יש צורך בפונקציית מטרה והגדרה של מה נרצה להשיג כחלק מתכנון התנועה. לדוגמה, פונקציית מטרה יכולה להיות צמצום זמן. מהי הדרך המהירה ביותר מנקודה א' לנקודה ב'. הבעיה בתכנון מסלול אופטימאלי היא שהוא מחושב בצורה גלובאלית ויתכן שלא יהיה עביר עקב מכשולים שלא היו ידועים בזמן התכנון. אז יידרש תכנון מקומי הלוך בחשבון את אותם מכשולים. אחד האתגרים ברובוטיקה הוא הצעת אלגוריתמים מקומיים המבטיחים הגעה למטרה. במצב של סביבה משתנה ומטרה נעה הפתרון לא יהיה אופטימאלי, אלא לכל היותר תת-אופטימאלי.

ישנם אתגרים שונים בביצוע משימה זו. יש צורך בהבחנה בין מכשולים סטטיים – לדוגמה, נסיעה בכביש העלולה להיתקל ברכב תקוע. במצב זה, אפשרות אחת היא לעבור מעל הרכב התקוע, ואפשרות שנייה היא לעקוף את הרכב. אדם הנוהג ברכב נוסעים רגיל יבחר בעקיפת המכשול ואילו טנק יעדיף לעלות על הרכב התקוע מאחר ובמידה והיה עוקף אותו היה מתנגש ברכבים אחרים. במידה ויש מכשולים נעים, נרצה להימנע מלהתנגש בהם.

על מנת לפתור בעיה זו פותח מנגנון תכנון תנועה מבוסס מודל. הכוונה במודל היא מודל הקרקע, מיפוי האזור, תכונות הקרקע ומודל הרובוט. המודלים מאפשרים חישוב מגבלות התנועה של הרובוט. מגבלות התנועה מבטאות בצורת מגבלות על מהירות ותאוצת הכלי, דינאמיקת הרכב ואילו צי כוחות קרקע רכב. במידה

וברשותנו כל נתוני המודל, ניתן לחשב את המסלול האופטימאלי תוך התמקדות במינימום זמן. בעיה עיקרית בנושא זה היא מיפוי הקרקע. לא קיימות מפות מדויקות עם רזולוציה מתאימה. רזולוציה מתאימה היא סדר גודל אחד גבוה מגודל הרכב. ההשקעה במיפוי ברזולוציה גבוהה כדאית כיון שככול שהמידע מדויק יותר, ביצועי הרובוט יהיו טובים יותר. גם עם מיפוי מראש, יש צורך להתחשב בתכנון התנועה במכשולים חדשים שהונחו אחרי שבוצע המיפוי הראשוני. פתרון קיים הינו סורק לייזר הממפה את האזור. כאשר הוא מזהה מכשול, הוא מוסיף אותו אל המפה המקורית ומתכנן התנועה מחשב מסלול חדש העוקף את המכשול. כאשר מתגלה מכשול חדש, יש צורך להחליט האם ניתן לעבור את המכשול ובמידה וכן, באיזו מהירות ובאיזה אופן.

לדוגמה, במקרה של בול עץ החוסם את הדרך, פתרון אחד הוא לנסוע לאחור ולעקוף את המכשול. דרך אחרת היא להוסיף את בול העץ למפת הקרקע, כך שנוצרת גיאומטריה אחידה של מכשולים, גבעות, אבנים ובול העץ. המשימה החדשה היא לתכנן מסלול חדש שלוקח בחשבון את כל המכשולים. לצורך כך פיתחנו אלגוריתם המחשב את גבול המהירות הבטוחה של הרכב תוך התחשבות בתכונות הדינאמיות של הרכב. חישוב גבול המהירות מאפשר אופטימיזציה של מהירות הרכב ונסיעה במהירויות גבוהות מבלי שנחצה את המהירות הגבולית. יישמנו שיטה זו על רכב אוטונומי שפותח במעבדה. סורק הלייזר שעל הרובוט סורק את תנאי השטח ומתכנן התנועה בוחר את הנתבי הרצוי.

במקרה של מכשולים נעים, על הרובוט לבחון את תוואי הדרך של המכשולים השונים ולחשב את הדרך והמהירות המתאימות על מנת לא להיתקל באף מכשול. לצורך כך פיתחנו את מכשול המהירות (velocity obstacle) המאפשר תכנון במרחב המהירויות במקום עקיבה אחר המכשולים עצמם. תכנון התנועה מבוסס על בחירת מהירות הרובוט מחוץ למכשול המהירות. השאיפה היא לבצע תכנון תנועה מקומי המחשב רק צעד אחד קדימה. בחישוב צעד אחד, עלינו לייצר את מכשול המהירות כך שישקף התנגשויות בטווח זמן נתון. מהו אותו טווח זמן? האם חשובות לנו התנגשויות הקורות בעוד שעתיים או בעוד 2 שניות? שאלה זו מביאה אותנו לאופק הזמן עבורו נייצר את מכשול המהירות. המטרה היא לקצר את אופק הזמן מאחר ואופק רחוק מידי גורם לקבלת החלטות קונסרבטיביות מידי.

אופק זמן קצר מידי עלול לגרום לכך שנגיע למכשול במהירות גבוהה מידי שלא תאפשר מניעת ההתנגשות. לכן, יש צורך במציאת אופק הזמן המינימאלי והבטוח. עבודתו של אורן גל עוסקת בכך.

על תכנון התנועה לקחת בחשבון גם את המגבלות הדינאמיות של הרובוט. מגבלות אלו ניתן לחשב על ידי אפיון אוסף המהירויות שניתן להגיע אליהן בפרק הזמן עד לתכנון הבא. אפיון סט המהירויות האפשריות בפרק זמן נתון מאפשר בחירת מהירויות שאינן חורגות ממגבלות הדינאמיות של הרובוט. מתכנן התנועה המקומי בוחר במהירות הנמצאת מחוץ למכשולי המהירות, אך בתוך סט המהירויות האפשריות. השיטה פשוטה ומתאימה לסביבות דינאמיות בים, באוויר וביבשה.

מושב שלישי: סנסורים לרובוטים

ד"ר אלון וולף, ראש המעבדה לבירורובוטיקה וביומכניקה, הפקולטה להנדסת מכונות, הטכניון

השאלה שאציג בהרצאה היא עד כמה אפשר להעתיק מהטבע ומה אנחנו עושים על מנת להעתיק מהטבע אלינו למעבדה. מבחינה היסטורית, תחום הרובוטיקה היה קיים עוד משחר היסטוריית היוונים, כאשר חשבו על מפלצות גדולות להגן על האי כרתים. לדוגמה, אתלוס היה מעין דמות כזו שאינה אנושית. בשנות ה-20, המחזאי הצ'כי, קרל צ'אפק, כתב מחזה על חברה אוטופית בה רובוטים עושים את כל הפעולות היומיומיות. כיום, אנחנו מעוניינים בפרטים הקטנים. לדוגמה, דיק קיימן פיתח במאות מיליוני דולרים יד רובוטית מלאכותית אשר מסוגלת לעשות כמעט כל דבר שיד אנושית יכולה לעשות. חזון הרובוטיקה החל כמשהו שעושה עבור בני האדם את כל הפעולות, ובתמורה התקבלו רובוטים שונים. כל רובוט עם מטרתו: שואב אבק, מדיח כלים ועוד. האבולוציה הרובוטית התפתחה בצורה של תת מערכות מאחר ופשוט יותר לפתור את הבעיות בצורה נקודתית. על מנת להמציא המצאות גדולות וליצור גירויים, המדע והיצירתיות צריכים ללכת יחד.

מבחינה היסטורית יש להזכיר את אייזיק אסימוב בספרו i-robot ואת שלושת הכללים של הרובוטיקה. הכלל הראשון של אסימוב הוא לא לפגוע בבני אדם. השני, רובוט צריך לציית לפקודותיו של אדם, כל עוד אינן סותרות את הכלל הראשון. ואילו השלישי, רובוט ידאג לשמור על קיומו ושלמותו, כל עוד הגנה זו אינה עומדת בסתירה לכלל הראשון או השני. נושא שחשוב להעלותו הוא נושא האתיקה. נשאלת השאלה עד כמה הרובוט יכול להיות עצמאי והאם הוא יכול לפגוע. כאשר מפתחים מערכות צבאיות עולה הבעיה האתית.

בהרצאה אנסה להדגים מה הקשר בין בירורובוטיקה ולביומכניקה שלכאורה נראים כשונים אחד מן השני. לדוגמה, תחום רובוטים דמויי אדם, שוק שנשלט על ידי היפנים. מה שחשוב במערכות אלו היא ההצלחה של המהנדסים לחקות את התנועה האנושית, הגפיים האנושיות והקוגניציה. ניתן לראות רובוטים אנושיים הולכים, רצים, קופצים, רוכבים על אופנים, רוקדים ועוד, כאילו היו אנשים אמיתיים. החוקרים והמדענים אשר בונים את הרובוטים האלו נדרשים לשלבים

רבים של תכנון, מדידה ועשייה עד ליצירת המודל הסופי. במעבדה שלנו, העוסקת בביומכניקה, מנסים לגשר על שלושת השלבים הראשונים על ידי מעבדה שנקראת מעבדת הליכה/תנועה שבעזרתה ניתן לבנות מודלים כיצד דברים זזים. המעבדה מורכבת מסט של מצלמות שנמצאות בהיקף של החדר. על הנבדקים מדביקים מחזירי אור (על הגפיים שאותן רוצים לבדוק), והמצלמות קולטות את מחזירי האור. לאחר קליטת מחזירי האור, נעשית אמולציה כמו ב-GPS וכך ניתן לקבל את התנועה לפי מיקום המדבקות. לאחר בדיקות הנבדקים ועיבוד הנתונים ישנו יישום על מערכות רובוטיות.

לאחרונה, ישנה בדיקה למען מערכת הביטחון בנושא מערכות הנשיאה של החיילים והנזקים הביומכניים. החיילים צריכים לסחוב על עצמם מערכות שלמות הכוללת אפודים, נשק ציוד ועוד. המשקל הכבד וחלוקת עומס לא נכונה יכולה לפגוע בעמוד השדרה וליצור נזקים ביומכניים אחרים, ניתן להשתמש בטכנולוגיה הזו על מנת לשפר את בריאות החיילים.

בחזרה לנושא הבירורובוטיקה, לדוגמא, "ביג דוג", כלב רובוטי בעל עבודה רגליים טובה, מגיב להפרעות חיצוניות, יודע להתגבר על מכשולים ועוד. על מנת ליצור כלב רובוטי כזה יש ללמוד את יתרונות התנועה של ההולכים על ארבע בשילוב חיישנים.

ישנו תחום ברובוטיקה, של יתירות גבוהה (hyper redundant robots). הכוונה היא לרובוטים בעלי דרגות חופש רבות, בדרך כלל יותר ממה שהם צריכים. דרגת חופש היא כמו מפרק – ובעצם גורמת לגפיים שלנו לזוז ולהסתובב בצורה רבה גדולה יותר מאפשר לא היה. רובוט עם יתירות גדולה יוכל להשתלב באזור של שטח קשה, יוכל להשתחל במקומות צרים ומפותלים ולאתר אינפורמציה "מעבר לפינה". ישנם אתגרים הנדסיים מעבר לתנועה עצמה. רובוטים אלה יכולים להיות רק כפלטפורמה לרובוטים וחיישנים אחרים כדוגמת מצלמות, מיקרופונים ועוד.

על מנת לפתור את בעיית התנועה נאלצנו להעתיק מהטבע. לדוגמא, רובוט בעל 16 דרגות חופש, זאת אומרת, 16 מפרקים ולכן דורש פיקוח על 16 מנועים בזמן אמת וזה מעשה כמעט בלתי אפשרי מבחינת תקשורת וזמן חישוב. לכן, נלקח

הפתרון מהטבע. אצל בני האדם הפקודות המוטוריות מהגפיים פונות למוח, אך ישנם גם רפלקסים שנמצאים ביחידות מוטוריות נמוכות יותר, כמו בעמוד השדרה. עקרון ה-distributed computing שימוש במיקרו מעבדים המפוזרים לאורך הרובוט ומבקרים אותו. יש לפתח מעיין חוט שדרה עם מעגלים אלקטרוניים שעושים את הפעולות האלו.

תחום גדול של רובוטים יתירים הוא הרובוטים הנחשיים. נערכים ניסיונות רבים לחקות את התנועה של נחשים אמיתיים, אך התוצאה רחוקה מהדבר האמיתי. דבר נוסף שנעשה הוא סימולציות דינמיות במטרה ולמדל אותם במחשב. המחשב יוכל לעשות פרדיקציה של התנועה של הרובוט. כמו כן, ניתן לעשות סימולציה של תווי קרקע ותנועה לפני שמזינים את האינפורמציה לרובוט.

ניתן לבנות רובוט שינוע בצורת תולעת ולא נחש. התולעת בעלת יכולות זחילה בצינורות צרים מאוד ולכן ניתן להשתמש בה לצרכים רפואיים. כיום ניתן לעשות ניתוח לב בעזרת שימוש בתולעת ללא צורך בפתיחת בית החזה.

נאמר כבר כי אקטואציה הינו מכשול גדול ברובוטיקה. לכן אנו מפתחים סוגי אקטואטורים גמישים ואלסטיים בעלי תנועות גדולות בעלות זולה. דוגמא לעבודה מעניינת שנעשית היא בתחום חקר תעופה של תנשמות. התנשמת בעלת יכולת לצוד בחשיכה מוחלטת ולתפוס את הטרף שלה מבלי לראות אותו. המטרה היא ליצור רובוט שיהיה בעל יכולת דומה. הרובוטים במעבדה מנסים לחקות את התנהגות התנשמת. נושאים נוספים חשובים ברובוטיקה, מזעור, עקיפת מכשולים, רפלקסיה ושימוש באנרגיה.

חיישנים ביולוגיים – ממשיק לביולוגיה, פרופסור יוסי שחב, אוניברסיטת תל אביב

אני מבקש להתמקד בסנסורים ביולוגים והחידושים בתחום. אתחיל בהצגת סנסורים חדשים משולבים עם מיקרו-טכנולוגיות וננו-טכנולוגיות ואסיים עם אחד הפיתוחים האחרונים שלנו, סנסורים קטנים לחישה של חומרי לחימה, רעלים באוויר ובמים, אשר יהיו זולים וחד-פעמיים.

כדאי להבחין בין גלאים כימיים וביולוגיים. מעבר להבדלה הברורה כי גלאים ביולוגיים מגלים חומרים ביולוגיים ואילו הגלאים הכימיים מגלים חומרים כימיים, יש להתייחס לגלאים אשר משתמשים בביולוגיה כגלאים ביולוגיים. לדוגמא, טכניקות ביולוגיות לגילוי חומרים הן כאשר מהנדסים חיידקים לגילוי תופעה מסוימת, או משתמשים באנזים לזיהוי חומרים שונים. כפי שהצגתי, בשנים האחרונות אנחנו פועלים לשילוב מיקרו וננו טכנולוגיות בפיתוחים בתחומים של מדעי החברה ורפואה במטרה ליצירת פלטפורמות קטנות בשילוב CPU, זיכרון, משדר ומקלט על מנת לארוז אותם באריזה בגודל מילימטרים בעלות של פחות מדולר.

ההיסטוריה של גלאים ביולוגיים עוקבת אחר ההיסטוריה של מערכות המיקרו והננו טכנולוגיות. בשנות ה-50 וה-60 טכנולוגיות אלו החלו עם פיתוח הטרנזיסטור. בשנות ה-80 החלה הפריצה הגדולה והחלה קניית מחשבים אישיים ביתיים ופיתוח של סיבים אופטיים. בשנת 1984, החלו המערכות הראשונות לגילוי סוכר אשר משולבות יחד עם אלקטרוניקה. החל משנת 1999, ישנו שימוש נרחב של רכיבים ביולוגיים וטכנולוגיות חדשות.

בשנת 2007, שוק הביו-סנסורים עבר את ה-10 ביליון דולר בשנה. לשוק זה יש גידול של 10% בשנה. ישנם שימושים רבים בשוק האזרחי שהולכים וגדלים. שוק זה לא היה קיים לפני כ-20 שנה וכיום יש חברות בשוק זה שמוכרות מעל מיליארד דולר בשנה. בתחום האקדמי, איתרנו כי המחקרים החשובים בתחום העל-סנסורים יהיו משילובים של הנדסה, מדעי החיים, רפואה ומדעים מדויקים. בעל-סנסורים יש אלמנטים שניתן לחלק אותם לאנזים, חלבונים ונוגדנים. באוניברסיטת ת"א, אנחנו עורכים מחקר על גלאים מבוססי חיידקים שניתן לשים אותם על

צמחים או תאים שמשמים כגלאים. ההבדל בין הגלאים, האנזימים, דנ"א הוא שהם גלאים ספציפיים, בעוד שגלאים מבוססי צמחים ותאים הם גלאי פונקציה שיכולים לגלות התנהגות ולא דווקא לחקור דבר ספציפי. כאשר בונים גלאים, יש לזכור כי הסנסורים הם חלק ממערכת. כאשר מתכננים יש לבחור את הסנסורים הביולוגיים יש לזכור כי יש עיבוד אות. יש לשים לב לכמות המידע, מקום האחסון שלו ולניתוח שלו. אם ניקח סנסור ביולוגי, אשר מכיל ביולוגיה, ניתן לבנות מיקרו-קונטיינרים בגודל מיקרוני, ונכניס לתוכם את החומר הביולוגי ולשים מכסה. במידה והחומר הביולוגי פלורוסנטי, נרצה כי המכסה יהיה שיקוף למען הסיגנל האופטי. יש מערכות שונות שהסיגנלים שלהם אלקטרו-כימיים, חשמליים או בדיקת מסה.

לתאי הסנסורים שתי אפשרויות. הראשונה, *soft mounting*, החומר מוכנס עם הנוזל שנכנס פנימה ואילו השנייה, *hard mounting*, החומר הביולוגי מוצמד ומודבק לשבב. יש שתי פלטפורמות, האחת, MEMS- micro electro mechanical system והשנייה, *Micro-Fluidics*.

יש מספר רב של התאמות טכנולוגיות. ישנם בעיות של סטריליות, טמפרטורה מתאימה, התאמת הסביבה, זרימת נוזלים, זרימת התהליך-יצירת הטכנולוגיה, אריזתה וכינתד ליישמה בפועל בשטח.

שיטות התמרת האותות רבות, ישנם מדידות אופטיות, לומניסנציה, מדידות פלסמה, אלקטרו-כימיקליות, חשמליות ומסה. חקר הטכנולוגיה הוא בעיקר על מזעור המכשור ובד בבד להקטין עלויות שיהפכו את השבבים לחד-פעמיים ואפשריים לייצור המוני.

דוגמה למערכת שנוצרה באוניברסיטת ת"א היא שבב אשר יכול לזהות רעלים. המערכת פותחה כחלק מפרויקט אירופי בשם "טוקסי-צ'יפ" והיא נועדה לגילוי רעלים בנוזלים ותרופות. אחת האפליקציות היא פיתוח סנסו-ביולוגי אשר ניתן תגובה דומה לתגובה אנושית לרעלים במטרה להחליף ניסויים על חיות מעבדה. יש שימושים רפואיים חדשים לאפליקציות לגילוי גלוקוזה, כולסטרול, רעלים, גילוי דנ"א ועוד. שימושים חדשים לשימוש בסביבה הן לאפליקציות של מים, איכות אוויר, פעילויות טרוריסטיות ולוחמה ביולוגית או כימית.

המטרה הסופית של סנסורים משולבים ביולוגית היא לבנות שבב ביולוגי עם גלאים טכנולוגיים ומערכות כיוול. אינטגרציה עם מעבד מבוסס סיליקון בעובי של מילימטר במטרה לייצור המוני זול.

אופן הגילוי המרכזי הוא אלקטרו-כימי, ואציג דוגמה של "האף המלאכותי" – גודלה כמה מיקרונים והיא מסוגלת לקשור חומרים ביולוגיים. כאשר החומר הביולוגי נקשר היא הופכת לקלה וכפיפה וכאשר מכוונים אליה אור לייזר ניתן לשים לידה גלאי-מיקרו ביולוגי ביו-סנסור. הפונקציות הביולוגיות מבוססות על האטרקציה בין החומר הביולוגי לחומר אחר. האינטראקציה זו משפיעה על תכונות חשמליות, מכאניות ותכונות אופטיות. הדור הבא של הסנסורים הביולוגיים הוא מעבדה על שבב. זהו סנסור שמכיל את כל מערכת המעבד ומערכת הזרמת הנוזלים.

שבבים ביולוגיים מקוטלגים לשלושה סוגים: genomics - שבבים המגלים דנ"א, proteomics-שבבים המגלים חלבונים ו cellomics - שבבים המגלים בעזרת תאים. השבבים הביולוגיים הם מרכיב המפתח לסנסורים הביולוגיים. סוגי הסנסורים הביולוגיים חיים בביולוגיה או משתמשים בביולוגיה. מערכות מעבדה רגילות הן יקרות וגדולות, ואנחנו בתהליך בניית שבבים איכותיים למערכות ניידות במחיר זול יותר לייצור המוני. הרעיון במערכת קטנה זולה היא האפשרות שלך להשתמש בשבבים אלו ללא הצורך לאסוף אותם, אלא אם כן לא נרצה לדעת שהשתמשנו בהם.

הדרישות החשובות מהסנסורים הן רגישות, עמידות, ניידות, אמינות, מהירות, דיוק, פשטות, עלות, התאמה לשטח ועוד כאשר המטרה היא שיפור והתקדמות בתחום.

אנחנו משתמשים בשבבים ביולוגיים על נכסי נדל"ן בגודל מילימטרים ופורסים מספר רב של גלאים שונים. המונח המקובל הוא microarrays, מערך של אלמנטים בגודל מיקרונים שיושבים על מצע מוצק אשר יכול להיות היברידי במידה ואני שם עליו חומרים ביולוגיים, נירונים, דנ"א או חיידקים. שתי דוגמאות לגלאים

של רעלים הקיימים היום הם של כולרה וגלוקוז. ישנם גלאים רבים אשר מגלים את סוג הרעל ואילו יש גלאים הבודקים האם יש רעל או אין. שימוש לכך אפשר לתת אם אדם רוצה לדעת האם הוא יכול לשתות מהמים שנמצאים לפניו, הוא לא מעוניין בסוג הרעל, אלא בשאלה האם הוא טובים לשתיה.

הגלאים מתחלקים לכמה סוגים. ראשון, גלאים ספציפיים אשר מזהים ביוכימיה. שני, גלאים פונקציונאליים אשר בודקים את תגובת האמולציה להתנהגות אנושית עבור פונקציה מסוימת וחוקרים האם יש בעיה. שלישי, גלאים פונקציונאליים אשר בודקים תגובה של מערכות ביולוגיות על השבב ועושים אמולציה להתנהגות של בעלי חיים.

באופן כללי, הנושאים הנחקרים באוניברסיטת תל אביב הם חומרים רעילים, חיידקים ותאי סרטן, תאי גזע ווירוסים. כעת ארחיב בנושא גילוי רעלים והחשיפה, ריכוז הרעל כפול זמן החשיפה. כאשר יש ריכוזים נמוכים זה יכול להביא לבעיות ב RNAi DNA. כאשר ריכוז הרעלים עולה זה יכול להביא לסרטן ובעיות בפוריות. נושא הגילוי הוא חשוב מאוד ומחייב גילוי בטוח של רעלים. הרעיון בשבבים אלו הוא שיהיה להם חיי מדף ארוכים, שאדם יוכל לשלוף את זה מהמדף ולהשתמש בו למשך שבועות. יש צורך בטכנולוגיית עזר על מנת לעשות אינטגרציה ביולוגית לשבב סיליקון. בהיבט הביולוגי, לכל תא יש גרעין, כרומוזומים ודנ"א. ניתן לראיין את הדנ"א, לייצר ממנו חלבונים וללמוד על התנהגות התא.

מהן אותן מערכות דנ"א קטנות (DNA micro-arrays)? הן בעצם סידור של רצף דנ"א על תמיכה מוצקת, המכיל אלפי גנים ומסוגלת באופן סימולטני להשגיח על שלבי הבעת הגנים. משתמשים בהן ללימודי הבעת הגנים, אבחון מחלות, מציאת תרופות וניתוח רעלים. הבעיה העיקרית היא שהמערכת עדיין מסובכת. שבב הדנ"א גדול ודורש כוח חישוב חזק ופעולות הכנה. כאשר השבבים עובדים הם נותנים תוצאות מדויקות אך הן מתאימים לתנאי מעבדה ואינם מתאימים לתנאי שטח. שבבי הדנ"א דורשים עיבוד נוסף, יש צורך במערך של ספוטר או PCR-poly-merge chain reaction. כמות הדנ"א בחומרים ביולוגיים היא קטנה מאוד ויש להגביר אותה, מהלך שלוקח זמן רב, יקר ומסובך.

אחת מהאלטרנטיבות טכנולוגיות היא שבב פרוטאין-חקירה של חלבונים, תוצר הדנ"א. יצירה של מערך חלבונים (protein-arrays), שכרגע נתקבל במגבלה מכיוון שהוא מסובך מידי וכתוצאה מכך, עלותו גבוהה. יש צורך במחשב חזק בכדי לנתח את הנתונים.

אלטרנטיבה נוספת, פותחה יחד עם פרופ' שמשון בלקין מאוניברסיטת ירושלים והיא whole-cell devices. פרויקט חדש הוא The DipChip concept. מערכת ניידת, קטנה בגודל כף יד אשר נותנת פתרון מלא לדעת האם קיימים רעלים. הפתרון הטכנולוגי הוא בעזרת שורה של אלקטרודות, כאשר מצמידים עליהם חיידקים ו בעזרת תהליך ביוכימי ניתן לראות את התגובה שלהם לרעל, לדוגמה, רעלים כמו אתנול או פנול. המערכת מבוססת על בדיקה של התגובה לרעל באופן כללי ולא של לריכוזיו. את החיישן אנחנו בונים התוך החיידק והוא חש את הרעלים. במידה והחיידק מגיב לחיישן הוא מייצר חלבונים שנותנים סיגנל אופטי או אלקטרו-כימי וכך נוכל לדעת את התוצאה. ההסבר הביולוגי הוא שלחיידקים מוחדרים פלזמידים, מקטעים של דנ"א עם פרומוטרים ורפורטרים מתאימים.

לסיכום, הטכנולוגיה, התשתית והידע לייצר שבבים ביולוגים קיימים. היתרון הגדול של שבבים ביולוגים הוא גיוס הביולוגיה לשימושים שונים של גילוי רעלים וחומרים אחרים. ישנה עבודה עתידית במערכת של שילוב טכנולוגיות מהטבע וטכנולוגיות חדשות.

רשתות חיישנים ללא השגחה, סגן אלוף ירון מאירוביץ, רע"ן מערכות משולבות ולוט"ר, מפא"ת

נושא ההרצאה הוא רשתות חיישנים ללא השגחה, תרגום של המושג האמריקאי (Unattended Ground Sensors) UGS. אתחיל בסיפור בשנות ה-60, בוייטנאם. האמריקאים מתמודדים עם ה"הוצ'י מין טרייד", נתיב הברחות באורך מאות קילומטרים מהצפון לדרום אשר מורכב מנתיבי הברחה רגליים, אופניים ומשאיות. אמצעי לחימה רבים מוברחים בניסיון של האמריקאים להתמודד עם זה. לאחר כמה ניסיונות להתמודדות שנכשלו, פותח פרויקט איגלוויט, פרויקט סודי בזמנו שמבוסס על הטלת חיישנים מהאוויר. בפרויקט זה נעשה שימוש בחיישנים אקוסטיים וסמייים שנועדו לאתר את פעילות המשאיות והפעילות הרגלית. בתקופה זו עדיין לא הייתה תקשורת לוויינית והפעילות הועברה דרך מטוסים ששימשו כמנסרים. המידע מנתח בחמ"ל בארה"ב וחוזר חזרה למטוסים על מנת שיתקפו. הוייטקונג מגלים את החיישנים, ולאחר ניסיונות פגיעה במטוסים, התחוויר להם כי ניתן להוציא את הבטריות בחיישנים אלו. לאחר מכן, שיקללו את השימוש בחיישנים לטובתם, ובלבלו את האמריקאים עם תנועת משאיות סרק ולאחר מכן עם הקלטות של משאיות.

בסביבת הפעולה בעולם האזרחי יש רשתות חיישנים (wireless sensor network) עם אפליקציות של ניטור בעלי חיים, ניטור תופעות של גזים ושריפות, ניטור בחקלאות ועוד. בסביבת הפעולה בעולם הצבאי, ישנם צרכים צבאיים, תוצרים של סדנת לחימה. מאחר וישנו צד חזק עתיר טכנולוגיה של לוחמה טכנולוגית, הצד החלש הולך לסביבות פעולה של שטחים סגורים בהיבט של קווי ראייה שמבטלות את היתרון. בסביבות שהמטרות הן זריזות, קטנות ורחוקות יש פתרון בצורת מערכות חיישנים. מאפייני מערכות רשתות חיישנים בעלות יכולת ניטור שטח, ללא שהייה של כוח אדם, היא שרידות ורציפות שהייה בין שבועות לשנים. מנושא השרידות נגזר נושא החשאיות. מערכת שאינה חשאית אינה אפקטיבית. כוחות הנגד ידעו להתחמק ממנה, להונות אותה, לפגוע בה ועוד. מכאן, ביצועי המערכת הנדרשים הם סיכויי גילוי וקצב התרעות שווא מספקים, סיווג מטרות ואיכון. לדוגמא, יש צורך להבדיל בין זיהוי חקלאי תמים לבין מחבל. כמו כן, תפוצה רחבה, מקיש על קלות תפעול ובר הצטיידות (היבט כלכלי). מדוע

יש צורך ברשתות חיישנים? רשתות החיישנים עוזרות בהגברת משך המשימה, ניטור מרחב ולא נקודה, מעקב אחר מטרה, שימוש בגלאים שונים לשיפור ביצועים (סיסמי, אקוסטי, מגנטי, אופטי, מכ"מ) ויתירות. כמו כן, רשת חיישנים מאפשרת: התגברות על הסתרות, הארכת משך משימה וחשאיות. לרוב, משך המשימה הינו מוגבל ויש לעיתים צורך בגמישות באנרגיה ובאורך הפעולה. הגמישות הגדולה כאן היא הגמישות המבצעית.

מרחב הצרכים של רשתות חיישנים במשימות הגנתיות או התקפיות כולל מהגנת כוח, אבטחה היקפית, אבטחת עורף ואגפים, תצפית, תשמוע, הגנת גבולות, איכון שיגורים, עתודות אויב, אמנעה והתראה. ניתן לחלק את המשימות לשתי קבוצות. האחת, הגנתיות, מתוכננות ומשימות אבטחה ואילו השנייה, התקפיות ומזדמנות. בקבוצה הראשונה יש זמן לתכנון משימה, זמן המשימה ממושך ויש צורך בחשאיות. בקבוצה השנייה הביצוע מיידי, זמן משימה קצר יחסית ונדרשת גמישות מבצעית. במידה ונרצה להפיץ באופן רחב, רשתות החיישנים חייבים להיות במחיר שהוא אפשרי.

אתגרים שונים עומדים בתחום זה. אתגר ראשון, ההבדלים בין חיישנים מוטלים לחיישנים מונחים. לדוגמא שני החיישנים בעלי מערכת ססמית מצוינת מעולם החי, כאשר האחת (עקרב) חיה על הקרקע ואילו השנייה חיה בתוכו (חולד). יש לראות זאת כמקרה בוחן בין חיישן מונח לחיישן מוטל. מאפייני החיישן הסיסמי: טווחי גילוי מוגבלים, בד"כ מספר מטרים, רגישות גדולה לרעשי הסביבה וטווח הפעולה, לדוגמא סוגי קרקע שונים. כמו כן ישנם סוגי חיישנים שונים: חד צירי או תלת צירי, תלוי בהיטל הקרקע, מדידת מהירות\ תאוצה וגודל (גיאופון, MEMS).

ישנה דילמה של גודל מול מספר, לא מול האתגרים הטכנולוגיים אלא דרך שיטת ההפעלה המבצעית. לדוגמה בפעילות מבצעים, הדילמות הקיימות הן כוח החיילים ומקבץ החיישנים. לא ניתן להטמין מקבץ רב של חיישנים מאחר וזה לא חשאי, כך גם לגבי מספר רב של חיילים. דילמה זו עדיין לא נפתרה. ניתן לומר כי כאשר ישנה הגדרה טובה של הפעילות המבצעית יותר קל להתמודד עם האתגר הטכנולוגי. שיטה אחת לפתרון היא שיטת הפיתוח הספירלי ע"י איזון חוזר ופיתוח של דגמים לשטח.

אתגר מספר אחד במערכות חיישנים הוא האנרגיה. משך זמן ממושך של משימה דורש אנרגיה. העולם האזרחי דוחף למקורות אנרגיה אך יש צורך בהתאמה לעולם הצבאי. לדוגמה, אפליקציה של תאי דלק לא בהכרח תתאים לחייל, מאחר ופגיעה בתא הדלק יכולה לפגוע בחייל. אנרגיה נוספת שיש להתייחס אליה היא טעינת אנרגיה מהסביבה. מחד, ניתן להשתמש בתאים סולריים, אך הם פוגעים בבעיית החשאיות. זאת אומרת, שימוש בתאים סולריים מנצנים יבלוט בשטח ואינו חשאי. הדרישות עצמן גורמת לזלילת אנרגיה. על מנת להגיע לסיכויי גילוי טובים ככל האפשר, יש צורך במנגנון ליצירת מינימום התראות שווה כדוגמת כוח עיבוד. היתוך מידע הוא סוג של כוח עיבוד. מאחר והתקשורת לוחכת קרקע ניתן להגביר את עוצמת השידור. מאחר ויש צורך להגדיל מבצעית אל מול השטח את גמישות החיישנים ולהגביל את המרחק זה ידרוש אנרגיה רבה יותר. הפתרון נעוץ בניהול חכם של אנרגיה.

התקשורת היא נושא מרכזי ברשתות החיישנים. הכוונה היא לא בבחירת הנתיבים, לדוגמה נתיב יעיל מבחינה אנרגטית אלא לעיתים יש צורך בבחירת נתיב יעיל מבחינת זמן. זאת אומרת, באיזה נתיב תתקבל ההודעה במהירות המרבית. בניסויים שנעשו עבור מערכת תקשורת מסוימת, ככל שהייתה התרחקות מהקרקע, כך טווחי התקשורת גדלו. הרגישות לקרקע גבוהה מאוד.

לדוגמה, נעשה מחקר בו בדקו 18 סביבות שטח שונות ובדקו תדרים שונים. את תוצאות הניסוי בדקו בעזרת מודלים אנליטיים ובדיקות שטח שונות שהביאו למסקנות כי יש רגישות לסוג הקרקע ותכונותיה. מחקר נוסף שנערך בדק את ההשפעות של מיקרו אקלים. תוצאות המחקר הראו כי יש חשיבות לפיזור גלי הרדיו בטמפרטורות שונות, ולכן יש השפעה לעונות השנה ושעות היום. כמו כן, גורמים כמו לחות, גשם וצמחיה משמשים כגורמים משפיעים.

בעיה גדולה שאנחנו נתקלים בה היא ניסיון התקשורת בתוך הקרקע. יכולת השידור בקרקע מוגבלת מאד. האתגר הגדול שמתמודדים עימו בחיישנים בתוך הקרקע הוא ניסיון החשאיות. החיישנים הם חיישנים מגנטים וחיישנים ססמיים, וההתאמה שלהם לקרקע טובה מאחר והיא שקופה עבורם וניתן להסוותם. הבעיה

נוצרת כאשר מתייחסים לתקשורת. מאחר והחיישנים בתוך הקרקע, יש להוציא אנטנות כלפי חוץ על מנת ליצור קליטה טובה של תקשורת. אנטנות אלו מקשות על הסוואתם של החיישנים.

היתוך מידע חשוב מאוד בעיקר בנושא של התרעות שווא. ישנה דרישה בסיסית בהפרדה בין גורם תמים לגורם שאינו תמים. המטרה היא לקבל התראות שווא נמוכות ככל האפשר. לדוגמא, אדם שמסתובב בשטח פתוח – נוכל לזהות אם הוא תמים או לא, בעזרת חיישנים מגנטיים שמזהים האם אדם מסוים מסתובב עם מתכת. ההנחה היא שאם אדם מסתובב בשטח עם מתכת הוא יהפוך לחשוד. ותיקי מפא"ת מכירים את מקרה העבר בו גילו כי לפרות יש חתימה מגנטית ועל כן הפרות היו מתגלות כגורם חשוד.

חיישנים זעירים, smart-dust, עובדים על עקרון שיתוף עולמות התוכן של המונח ומותג ולהקטין את זה באופן פיזי למילימטרים. היתרון של גודל זה הוא החשאיות. ניתן לפזר או להניח חיישנים בצורה שהם לא יבלטו בשטח.

מספר נקודות לסיכום: ראשית, רשתות חיישנים ללא השגחה מתאימות לשימוש בשדה הקרב המודרני ונכון לשלבן במערך האיסוף. שנית, קיימות מספר מערכות אב (חיישנים מוטלים, חיישנים מונחים, חיישנים פזירים) השונות במהותן המבצעית ונגזר מכך פיתרון טכנולוגי אחר. שלוש, גישת הפיתוח למערכות אלו מחייבת פיתוח מוכוון הנדסת מערכת כוללת לדרישות טכניות סותרות. לבסוף, תוכנית מו"פ מושכלת המתמקדת בפיתוח כלים מערכתיים מחד ופריצת חסמים טכנולוגיים תוביל להצטיידות במערכות אלו בעשור הקרוב.

אריה במדבר, פרופסור עירד בן גל, הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת תל אביב

ההרצאה תעסוק בשיטות חיפוש אופטימאליות אחרי מטרות נידות וניחות, אציג את תורת ההפעלה שיש להתמודד עימה במצב בו עומד לרשות המחפש מערך חיישנים קיים. מערך החיישנים אמור לשרת את שיטת החיפוש ולכן תשומת לב עיקרית צריכה להיות לשיטת ההפעלה ולא רק לפיזיקה של החיישנים. לדעתי, יצרני מערכי החיישנים, כגון התעשייה האווירית, צריכים להבין כי מעבר להתמקדות בפרמטרים ובתכונות החיישנים חשוב מאד לפתח חוכמת ההפעלה של אמצעים כגון מזל"טים, חיישנים קרקעיים ולמזג מידע באופן שמשרת את שיטת החיפוש.

כאשר מדברים על מציאת מטרה, החידה הראשונה שעולה על הדעת היא "כיצד מוצאים אריה במדבר"? על מנת למצוא מטרה נייחת דוגמת אריה במינימום זמן יש לחלק את המדבר לחצאים שוב ושוב עד למציאת המטרה. הבעיה היא שיש צורך בקבלת מידע על שטחים רבים בו זמנית. העיקרון לחלוקה אופטימאלית של השטח הוא מקסימום אנטרופיה. חלוקת המדבר לחצי השטח נכונה בתנאי שהסתברות למציאת המטרה היא שווה בכל החלקים, אך כלל זה לא תופס במידה וההסתברות למציאת המטרה אינה אחידה. לדוגמה, במידה וישנו נווה מדבר, הסיכוי למציאת האריה באזור זה היא רבה יותר מאשר באזורים אחרים ולכן חלוקת השטח לא תהיה לחצי במקרה כזה, אלא לחלקים שיבטיחו מקסימום אנטרופיה. במקרה כזה אנו מובטחים שהאריה הנייח יימצא תמיד במספר צעדים מינימאלי. כאשר מדובר באריה אמיתי, שיכול לזוז ממקום למקום, לא בטוח שנמצא את האריה לעולם – בעיית החיפוש של מטרה נידת מעל למרחב הסתברותי היא בעיה קשה מאד אותה מנסים לפתור כבר למעלה ממאה שנים, אך ללא הצלחה. דהיינו, לא קיים פתרון למציאת אלגוריתם חכם שיודע למצוא בצורה אופטימאלית אריה זז במדבר כך שיבטיח את לכידתו במינימום זמן.

חשוב להבין כי ישנן אפליקציות שונות רלוונטיות לבעיות החיפוש של מטרות נעות בתחומים שונים. לדוגמה, מעקב אחרי משתמשים במקרה של מעבר בין אנטנות של רשתות סלולריות (paging), ניטור בעלי חיים באמצעות רשתות חיישנים,

תכנון משימות לרובוטי ניווט וחיפוש, אפליקציות צבאיות בתחומי צבא וביטחון המולדת, distributed hash tables – מציאת קבצים רלוונטיים בטבלאות של רשתות P2P, אפליקציות חיפוש ברשתות אינטרנט ותוכנות שיתוף קבצים - שירותי מערכות SAAS: תקלת זיהוי, מיקום תקלות התקני RF, ואפליקציות Data Mining (כגון עצי החלטה וכו').

בהרצאה זו אציג שתי אפליקציות, האחת מכוונת חיישנים (סנסורים) - על מנת לקבל תחושה ליישומי של paging ברשתות סלולאריות ואילו השנייה, קשורה למערכות לזיהוי באמצעות רובוטים של מערכות צבאיות.

הראשונה, בתחום paging – הטלפונים הסלולאריים קשורים לאנטנות, אלו ממוקמות בתאים כאשר מספר תאים מגדירים אזור. המידע נאגר במערכות מחשוב שמגיעות עד לרמת מערכת המחשב המרכזית של החברה הסלולארית. כאשר אוגרים את המידע יש אינדיקציה היכן נמצא כל מכשיר סלולארי. בעזרת הסנסורים, שהם האנטנות במקרה זה, ניתן לבדוק מתי המטרה הנעה עוברת מאזור לאזור. מערכת המחשוב המרכזית בודקת את האותות המגיעים ויודעת להעביר את השיחה לאזור שבו נמצא המכשיר. כמובן, שמערכת זו חייבת לזהות תוך שניות את מיקום המכשיר (הוא המטרה). הבעיות בתחום זה הן של אנרגיה ושימוש בתדרים שלא לצורך. יש לעשות אופטימיזציה בהשקעה של שידור מיקום המכשיר לרשת. במידה ולא נרצה להשקיע בשידור המרבי, יהיה קשה לאתר את המכשיר באזור רחב ולהיפך. אגב, בעייתיות זו של איתור מטרות ניידות ברשת קיימת תיפותר כאשר לכל המכשירים תהיה מערכת ניווט פנימית בעוד שנים מעטות.

הדוגמה השנייה, זיהוי באמצעות רובוטים או כטב"מים של מטרות נעות במרחב. הספרות הענפה שעוסקת בתחום היא בדרך כלל בתחום חקר הביצועים. כיצד מנהלים באמצעות החיישנים בדיקה ואיתור של המטרה הספציפית והפרדה בין המצבים בהן המטרה מיודעת לחיפוש או שאינה מיודעת לו. ניתן למדל את החיפוש המודע באמצעות תורת המשחקים. בבעיות אלה ישנם שני סוגי חוסר ודאות אצל המחפש. האחד, חוסר ודאות לגבי הסביבה והשני, חוסר ודאות לגבי המטרה. במידה ומרחב החיפוש והמטרה ידועים למחפש, קיימת עדין בעיית ניווט

והתמודדות עם האתגרים שהשטח מכתוב אך אין בעיית חיפוש. יש צורך בהתגברות על אי הוודאויות וישנן שיטות אותן פיתחנו לצורך זה. בהמשך לעבודה שנעשתה עם הדוקטורנט יבגני קגן פותחו שיטות חיפוש אשר מנסות להתמודד עם אי הוודאויות של הסביבה ומיקום המטרה. ההנחה כי המטרות יכולות להיות סטטיות ודינמיות כאחד. לדוגמא, אציג רובוט מחפש ורובוט מטרה בעל יכולות שינוע אופציונאליות, במידה ויש לנו את המיקום של המטרה ומידע מלא לגבי השטח, ישנה בעיה של ניווט ולא של חיפוש. האופציה הראשונה היא בחירה של המסלול הקצר ביותר, אך לעיתים עקב בעיות השטח יש צורך במסלול עוקף. במקרה של חוסר וודאות לגבי הסביבה, קיים לעיתים מידע מקומי בלבד ע"ס חיישנים לטווח קרוב. לכן יש צורך בפיתוח אלגוריתמים לפתרונות מקומיים התלויים בהתקדמות הרובוט המחפש עד להגעה למטרה.

במקרה השני של חוסר הודאות, כאשר יש אינפורמציה מלאה על נתוני השטח, הרובוט מקבל אינפורמציה מלאה אך אינו יודע היכן המטרה. את בעיה זו ניתן לפתור באמצעות שימוש במפות הסתברותיות. הכוונה כאן היא במיזוג כל מקורות המידע הקיימים לכדי מפת הסתברות אחת דינמית אשר משתנה בהתאם לאינפורמציה המתקבלת. מפה זו אמורה לתאר את ההסתברות של הימצאות המטרה בתא שטח ספציפי בכל רגע נתון. הבעיה שמתעוררת לאחר מכן היא בעיית ההשלכה. יש להשליך את הנתוב ממרחב ההסתברות לנתיב האמיתי על כל המגבלות והאתגרים שהשטח מציב. השלכה זו היא תלוית זמן ולכן לא תמיד תתאים לכל משימה.

הבעיה מורכבת כאשר היא מאגדת בתוכה את שני מקורות חוסר הודאות לגבי מיקום המטרה והשטח. לצורך כך תכננו אלגוריתם שמטפל בבעיה זו, הוא יודע להסתכל כל פעם על תא שטח נתון אחר. זאת אומרת, בכל נקודה ונקודה של אותו אלגוריתם הוא מחבר את המידע הוודאי המתקבל מהחיישנים בתוספת הערכה לגבי מיקום המטרה. כאשר מדברים על מרחב החיפוש במקרה זה, הוא אינו אוקלידי במובן של מרחב רגיל פיזי, אלא מרחק אינפורמאציוני שעובד על גבי המרחב ההסתברותי. ולכן שהאלגוריתם בוחר את תא השטח הבא לבדיקה, הוא לאו דווקא השטח הקרוב ביותר גיאוגרפית למיקום המחפש, אלא תא השטח שישנו את האינפורמציה הרבה ביותר לגבי מיקום המטרה. הרעיון מבחינה ויזואלית

דומה לתזוזה במרחב רגיל, אך הוא למעשה מיושם על גבי מרחב הסתברותי הניתן להשלכה לגבי המרכב האמיתי. התוצאות מראות כי האלגוריתמים עובדים בעיקר בבעיות פשוטות בעלות הנחות רגילות. העבודה עם מרחב הסתברותי אפשרה לנו להציע אלגוריתמים אופטימאליים למציאת מטרה נידת תוך זמן חיפוש מינימאלי.

אתגרי ראייה ממוחשבת ברובוטיקה, עפר סלומון, רפא"ל

הרצאתי עוסקת ב"אתגרי ראייה ממוחשבת", כאשר המילה "אתגר" היא בדרך כלל מילה עדינה לבעיות וקשיים, וזאת בניגוד להתקדמות ופריצות הדרך שהוצגו במהלך הכנס. בהרצאות שקדמו לי הועלתה הסכנה שרובוטים יהיו בעלי אינטליגנציה גבוהה ו"הגולם יקום על יוצרו". לכך באה ההרצאה שלי, למען הסר דאגה מליבכם, סיטואציה זו לא תקרה בטווח הקרוב, כפי שמיד תראו.

קיים מגוון רחב של סוגי רובוטים בפלטפורמות שונות: אוויריות, ימיות, יבשתיות, חצי אוטונומיות ואוטונומיות. בכל הפלטפורמות האלה, בני האדם מנסים להשליך את החשיבה האנושית על הרובוטים. לדוגמה, האדם הוא יצור חזותי מאוד ולכן רוב הרובוטים מצוידים באמצעי ראייה. במהלך ההרצאה אציג את הבעיות, הקשיים, הפתרונות וההישגים בנוגע לחיישנים היוזואליים.

הטכנולוגיה של "ראייה ממוחשבת" משלבת בין התמונות המתקבלות ממצלמות הרובוטים ובין אלגוריתמיקה משוכללת, על מנת לבנות מודל של הסביבה ולנתח את מיקום הרובוט ביחס אליה, לאתר עצמים שונים ולהימנע ממכשולים, כאן מתחילים האתגרים:

עקיבה: בדרך כלל לרובוט יש מטרה מסוימת, ולעיתים המטרה היא דינמית והוא צריך לעקוב אחריה. לכן רובוט אוטונומי חייב להכיל אלגוריתם עקיבה. מאחר ורוב הרובוטים כיום אינם אוטונומיים יש צורך בשליטה ופיקוד מרחוק. אבל בגלל ערוץ התקשורת, התמונות מתקבלות לעיתים בהשהיה מסוימת, ולכן קשה למפעיל לעקוב על מטרות בצורה מדויקת. גם כאן תבוא הראייה-הממוחשבת לעזרתו.

הנושא המשמעותי ביותר על מנת להפוך את הרובוט לאוטונומי הוא בניית "תמונת עולם". רובוטים לומדים לעשות תמרונים שונים על מנת להגיע או לבצע את היעד. האתגר העיקרי הוא בכך שסביבת המציאות אינה סביבה אידיאלית ומבוקרת וישנם משתנים רבים שמשפיעים.

אתגר נוסף שיכול להיות גם הפיתרון העיקרי לבעיות הראייה הממוחשבת הוא "מציאת מיקום עצמי". הרובוט צריך לזהות היכן הוא נמצא על מנת שיוכל להתקדם. האתגר העיקרי נמצא בעיקר בתוך מבנים כאשר יש צורך בממצאים מדויקים ללא יכולת הסתמכות על מערכות ניווט. במקרים כאלו, הדיוק חייב להיות גבוה על מנת לעשות עבודה מדויקת. לדוגמה, זיהוי מכשולים כגון מדרגה, הכנסת עצם כלשהו למיקום מדויק ועוד. על מנת להמחיש את הנושא ניתן לראות את הנחילים של החרקים בטבע; אין אלגוריתם מתוכנן מראש או תוכנית פעולה מסודרת אלא למעשה למידה של המערכות תוך כדי תנועה. המערכות לומדות באופן רציף את המיקום שלהן. זה הבסיס לענף הלמידה החישובית ברא"ם, והוא מתקדם ומתפתח בעיקר תודות לאתגרי הראייה הממוחשבת של הרובוטיקה.

אציג שתי דוגמאות להמחשת הנושא. דוגמה ראשונה, מצלמת רובוט שמתקדמת במסדרון ופונה פניות של 90 מעלות. דוגמה שנייה, ניסיון לאתגר את המערכת. בסביבת חוץ, סומנה לרובוט מטרה מסוימת, וגם כאשר הוא אינו רואה אותה הוא יכול לאתר את המטרה. טכנולוגיה זו נקראת (simultaneous localization and mapping) SLAM. טכנולוגיה זו מוצאת את המיקום העצמי של הרובוט ובו זמנית ממפה את הסביבה בה הוא נמצא.

הימנעות ממכשולים, הוא אתגר שיש להתייחס אליו ברצינות. אציג דוגמה שנעשתה בארה"ב (urban challenge): התקיימה תחרות של רכבים אוטונומיים שצריכים להשלים מסלול-נסיעה תוך ניסיון התגברות על מכשולים. בעזרת לחיצת כפתור אחת, הרכב מתחיל לנסוע, הוא עוקף מכשולים באופן עצמאי אך לבסוף נתקע במכשול אחד ואינו מצליח לצאת. הרכב עמוס במצלמות, חיישנים וסנסורים ונראה כי גם זה אינו מספיק.

יש לתקוף אתגר זה בעזרת בניית מודל מדויק של הסביבה. יש לדעת את מיפוי המכשולים ברזולוציה של פחות מסנטימטרים. מתמונות וזוויות שונות, מכשול מסוים נראה אחרת, ולעיתים לא ניתן את התמונה המלאה ביחס לסביבה. כמו כן, לעיתים ישנה תזוזה של אנשים שלא ניתן לחזות אותה במדויק. אחד השדות החדשים בנושא עקיבה, נדרש לסגמנטציה מורכבת בזמן אמת.

בניית תמונת עולם היא למעשה הבנת הסביבה והבעיה העיקרית היא הצפת המידע. ישנו אוסף חיישנים על הרובוטים מרובי-המצלמות, ואת הנתונים המתקבלים הופכים בעזרת אלגוריתמים למידע כגון: תנועה, מסלולי עקיבה, מיפוי הסביבה, סיווג האובייקטים. את המידע הזה יש לפרש ולהבין האם זהו מכשול, מטרה או אחר. מיזוג מידע הוא אחד הנושאים העיקריים אשר מתמקדים בהם היום. לעיתים הרובוט אינו מצליח לסווג את האובייקטים במדויק, או אף לזהות את קיומו.

ישנה פעילות נוספת, שמטרתה לזהות חפץ חשוד. המערכת מצליחה לזהות מזוודה שהושארה בכוונה במקום שאינה אמורה להיות בו. הבעיה היא שהניסוי נעשה בסביבה סינטטית ואילו זיהוי חפץ חשוב במערכת דינמית חיה יהיה בעייתי יותר.

איכות המצלמה חשובה מאוד, לעיתים מה שנראה מרחוק אינו קיים במציאות. לדוגמה, ניתן לראות בתמונה כיפת מסגד, אך כאשר מפקסלים את התמונה ומעבדים אותה באלגוריתם של סופר-רזולוציה רואים כי זה גג של מפעל תעשייתי. כמו כן, ישנן בעיות נוספות של מזג האוויר, ערפל, מערבולות אוויר, אובך וכמובן איכות המצלמה ועלותה.

אקורד הסיום להרצאה זו הוא הרובוט ההומינואיד, שהוא אחד ההישגים המדהימים של הטכנולוגיה. אבל הביטו בתמונה הבאה: התינוק הזה, עם המוח הצעיר שלו, מביא אותו לידי פיהוק גם אחרי כל מה שהצגנו בכנס, כי הרי הוא עושה את כל העקיבה, והגילוי, והסיווג, ללא מאמץ, ובעיקר ללא תקלות.