

עבודת נמלים

חיפוש, סיור וכיסוי במערכות מרובות סוכנים

חיבור על מחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר

דוקטור לפילוסופיה

מאת

ישראל א. וגנר

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

אב תשנ"ח חיפה אוגוסט 1998

תקציר מורחב

*לך אל נמלה עצל ראה דרכיה וחכם
אשר אין לה קצין שטר ומושל,
תכין בקיץ לחמה
אגרה בקציר מאכלה
(משלי ו', ו-ח)*

עבודה זו עוסקת בסוכנים דמויי נמלים, שהינם יצורים פיסיקליים או וירטואליים פשוטים, שנועדו לשתף פעולה להשגת מטרה משותפת. היצורים דומים לנמלים בכך שמשאבי האנרגיה, החישה והחישוב העומדים לרשותם מוגבלים ביותר, בכך שביכולתם להתקשר ביניהם בעזרת עקבות המושארים בשטח הפעולה המשותף, כמנהגם של בעלי חיים רבים, וגם ביכולתם לתפקד בהצלחה ללא ניהול מרכזי. בעבודה זו נראה כי גישה כזו עשויה להביא לשיתוף פעולה יעיל בין הסוכנים; הביצועים ייחקרו ע"י ניתוח מתמטי וסימולציות מחשב.

רקע

כשהזמן קצר, המלאכה מרובה, וסוכנים רבים זמינים לעשותה, ברור מאליה כי רצוי לחלק את העבודה בין הסוכנים. חלוקה כזו יכולה להיעשות באופן ממורכז ע"י מנהל השולח הוראות לכל הסוכנים, או ע"י הסכמה מראש על חלוקת עבודה אשר, אם תישמר ע"י המשתתפים, תביא לבסוף להשלמת המשימה הנתונה. דרך שלישית, המשמשת בעבודת מחקר זו, מבוססת על הנחיית הסוכנים כך ששיתוף הפעולה ינבע באופן טבעי מפעולתם, ללא החלטה מראש על טיבה המדויק של חלוקת העבודה ביניהם. המשימה המסוימת בה נעסוק היא משימת כיסוי, הנקראת גם סיור או חיפוש. ריבוי זה של שמות עשוי לרמוז על מגוון רחב של שימושים, החל בניקוי רצפה של בית מגורים, עבור

דרך מיפוי כוכב לא נודע, וכלה בסילוק אוטומטי של מוקשים משדות קרב שלאחר שוך רעמי התותחים. מטרת עבודה זו היא להציע מספר סוגים של כללי התנהגות לסוכנים, ולנתח את ביצועיהם תחת הכללים השונים. אחת מהנחות העבודה היא שמבנה הסוכנים פשוט ככל האפשר, וזאת ממספר טעמים:

1. בדיקת הגבולות:

השימוש בסוכנים פשוטים מאפשר, במקרים מסוימים, ניתוח אנליטי הנחוץ הן לבדיקת גבולות היכולת של המערכת והן להבטחת השלמת המשימה בתוך זמן צפוי. רמה זו של ניתוח היא בדרך כלל קשה, ולעתים אף בלתי אפשרית, במערכות עם סוכנים משוכללים יותר.

2. השגת אמינות ע"י יתירות :

תכנון וייצור של רובוטים מתוחכמים בעלי אמינות גבוהה הוא עניין יקר מאד. לדוגמא, רובוט ניסיוני במחיר בינוני עשוי לעלות כ-\$20000 עד \$40000. בעיה נפוצה במערכות רובוטים, במיוחד בזולות שבהן, היא דיוקם הנמוך של החיישנים. לפיכך, אם ברצוננו לתכנן קבוצת רובוטי תחזוקה שתהיה אמינה ולא יקרה מדי, עלינו לפשט ככל האפשר את מבנה החיישנים והחלקים הנעים של הרובוט. האמינות של המערכת תושג ע"י שימוש במספר רובוטים גדול מהנדרש, וע"י פיתוח פרוטוקולים המאפשרים לרובוטים השורדים לחפות על חסרונם של הנכשלים.

כדי להעריך את אמינות המערכות המוצעות, נבחן חלק מהשיטות תחת הנחות של רעש ואי-ודאות בקריאת החיישנים והתנהגות הסביבה. המונח "עבודת נמלים" מתייחס כאן לפשטות (אך לא טיפשות) של הרובוטים/סוכנים. משמעות חשובה נוספת של מונח זה היא בשימוש שאנו עושים ברעיונות מעולם החרקים כדי לאפשר תכנון בקנה מידה קטן להשגת מטרות בקנה מידה גדול. הגישה שנציע להשגת המטרות שהוזכרו יכולה להיקרא "ניווט פעיל". הרעיון העיקרי הוא להשתמש בסוכנים פשוטים ביותר (כגון מכוונות מצבים סופיות) ולהפעיל סימון דינמי של הסביבה ליצירת זיכרון משותף במערכת. הסימנים הדינמיים המושארים בסביבה עשויים להיות עקבות ריח הנעלמים עם הזמן (כדוגמת הפרומונים אצל הנמלים), חוט צבעוני המונח על הרצפה (כמו החוט ששימש את אריאדנה ליציאה מן המבוך), או סיביות אינפורמציה המאוחסנות באופן זמני בזיכרון המחשב (בדומה לווירוסי מחשבים או "עוגיות אינטרנט"). על פי גישה זו, הסוכן לא רק בוחן את הסביבה כדי להחליט על צעדו הבא, אלא גם מכניס בה שינויים מסוימים כדי לסייע לעצמו ולסוכנים אחרים בעתיד. הנחתנו הבסיסית היא שהסוכנים הם פשוטים (במובן של חיישנים, כוח חישוב ויכולת מוטורית), ושהתקשורת ביניהם מוגבלת (סימנים בסביבה, מגע). אנו נראה כי למרות ההנחות המגבילות, ניתן להשיג תוצאות מעניינות עבור זמן כיסוי, חסינות לרעש, ושיתוף פעולה ליצירת מבנים גלובליים (כגון עץ פורש או מעגל המילטוני בתהליך ה-VERTEX-ANT-WALK). מן מפורסמות היא כי בעולם החרקים, יצורים פשוטים יכולים לפעול להשגת מטרה משותפת במידה מפתיעה של יעילות. חוקרים שונים הציעו להשתמש בגישה דומה לתיאום קבוצה של רובוטים, ללא צורך בניהול מרכזי, תוך הסתמכות על אינטראקציות מקומיות בין הרובוטים. גישה מבוזרת זו חוסכת משאבי תקשורת רבים, עוזרת לפשט את מבנה הרובוט, ומאפשרת השגת מודולריות במערכת. מאמץ מחקרי ניכר הושקע בשנים האחרונות בתכנון והדמיה של מערכות מרובות סוכנים כאלו. עם זאת, ניכר חסרונה של תיאוריה גיאומטרית וטופולוגית לתיאור התנהגותן הדינמית של מערכות אלו. עיקר המטרה בעבודה זו - לתרום מעט לפיתוח הכלים המתמטיים הנדרשים לתכנון וניתוח ההתנהגות הגיאומטרית של מערכות מרובות סוכנים. ברוח ספרו של ברייטנברג, נניח כי סוכן הינו יצור אוטונומי בעל יכולת חישוב מוגבלת, זיכרון מוגבל, וחיישנים קצרי טווח המספקים מידע על הנעשה בסביבה הקרובה. הסוכן פועל בסגנון "און-ליין" (בניגוד ל"אוף-ליין") כלומר הוא אינו מתכנן את צעדיו מראש על סמך ידע מלא, אלא חש את הסביבה, שוקל קצרות ופועל בהתאם. בהתבסס על הניתוחים והדמיות שנעשו בעבודה זו, כמו גם על עבודות אחרות שנזכרו, נראה כי גם מערכות פשוטות עד מאד יוצרות בעיות מתמטיות מעניינות, אשר פתרון מוביל לאלגוריתמים מרובי סוכנים, העשויים להועיל בפתרון בעיות שימושיות.

נושאים ותוצאות עיקריים

להלן עיקרי התוכן והתוצאות של פרקי העבודה.

ניקוי קואופרטיבי - סוגיה בעבודת נמלים :

מוצג ניתוח של תהליך ניקוי או צביעה של תחום בדיד לא-קמור מעל הסריג השלם, כשהלכוך, או השטח הלא-צבוע, הנמצא מלכתחילה על המשטח שמש לתקשורת בין-רובוטית. אנו חוקרים את התנהגותה של קבוצת סוכנים המשתפים פעולה סריקת שטח בלתי ידוע, כשלכל אחד מהם אפשרות לראות את סביבתו הקרובה, ואמצעי התקשורת היחיד ביניהם מבוסס על זיהוי השטח שכבר נוקה או נצבע בידי האחרים. כמו כן הנחנו כי חלק מהרובוטים עשויים להפסיק את פעולתם לחלק מהזמן. האלגוריתם שנציע מבטיח השלמת המשימה גם אם כמעט כל הרובוטים מפסיקים לעבוד, ונראה כי הזמן הדרוש להשלמת המשימה חסום מלמעלה ע"י פונקציה של גודל השטח, צורתו, ומספר הרובוטים. האלגוריתם מבוסס על כך שכל רובוט מנקה את סביבתו, אך דואג שלא לפגוע בקשירותו של השטח המלוכלך, כלומר נמנע מלנקות נקודות קריטיות - כאלו אשר ניקוין יפריד את השטח המלוכלך למספר חלקים. באופן זה ניתן להבטיח כי קבוצת הרובוטים נעצרת לחלוטין רק עם כיסויו המלא של השטח, וכיסוי זה מושג גם אם חלק מהם הפסיקו לעבוד.

ריח כמשאב חישובי - כיצד נחכים מדרכי הנמלה :

חרקים מסוימים משתמשים בכימיקלים הנקראים "פרומונים" למטרות תקשורת ותיאום. אנו חוקרים את יכולתה של קבוצת רובוטים, המתקשרים ביניהם ע"י השארת סימנים, לנקות את הרצפה של בנין לא-ידוע, או לבצע משימות אחרות הכרוכות בסריקת רשת שאינה נתונה מראש. אנו מניחים שהרובוטים משאירים סימני ריח הנמוגים עם הזמן, ומסוגלים להשוות את העוצמה היחסית של הריח בין נקודות שכנות, עם טעות מידה מוגבלת. המודל המופשט הוא של מערכת רבת-סוכנים אדפטיבית בעלת זיכרון משותף, שמשתתפה נעים על קשתותיו של גרף אשר צמתיו מייצגים את אריחי הרצפה. נתאר שלש שיטות לכיסוי גרף בשיתוף פעולה, תוך שימוש בעקבות ריח הנמוגים עם הזמן, ונראה כי כולן מבטיחות כיסוי מלא של הגרף בזמן פולינומיאלי במספר צמתי הגרף. בניגוד לשיטות חיפוש קיימות (כגון חיפוש לעומק), האלגוריתמים שנציע הינם סתגלנים - כיסוי הגרף מובטח גם אם כמה מהסוכנים מפסיקים לעבוד או שהגרף משתנה במהלך העבודה (ובלבד שיישאר קשיר). יתרון נוסף של השיטות שנציע הוא ביכולתן גבור על מידה מוגבלת של רעש, במחיר הארכת זמן הכיסוי.

חיפוש און-ליין בגרף ע"י תהליך צמתים מונחה ריח :

נמלה צועדת לאורך הקשתות של גרף, ומדי פעם מותירה עקבות על הצמתים. עקבות אלו ישמשו אותה בהמשך המסע כאמצעי ניווט. נראה כי, תחת פרוטוקול מתאים, יכולה הנמלה להבטיח כיסוי מלא של הגרף בתוך זמן $O(ND)$ כאשר N הוא מספר הצמתים בגרף ו- D - קוטרו של הגרף. הילוך מונחה עקבות כזה מהווה שילוב של הילוך אקראי והילוך הנמנע מעצמו, שכן לצמתים שכבר בוקרו יש עדיפות נמוכה יותר בהחלטה על הצעד הבא. תכונה נוספת של תהליך זה היא שאם קיים בגרף מעגל המילטוני, אזי הוא מהווה נקודת שבת (לא בהכרח יחידה) של התהליך. אפליקציה אפשרית לאלגוריתם זה היא של חיפוש מבוזר ברשת גדולה כגון האינטרנט.

MAC כנגד PC – דטרמיניזם ואקראיות כגישות משלימות לסריקה רובוטית :

בפרק זה נתאר שתי שיטות לסריקת שטח מישורירציף (ללא סריג) ע"י קבוצת רובוטים עם חיישנים מוגבלים וללא תקשורת ישירה. לאחר שנראה חסם תחתון על אורך מסלול הכיסוי, נציג אלגוריתם דטרמיניסטי (MAC (Mark And Cover) לפתרון הבעיה, המשתמש בסימנים כאמצעי לניווט ולתקשורת לא-ישירה. נוכיח כי האלגוריתם מבצע את משימתו וזמן הכיסוי הוא $O(A/a)$ אופטימלי, כאשר A הוא שטח התחום שיש לכסות ו- a - השטח המכוסה ע"י הרובוט בצעד אחד. אלגוריתם ה- MAC ייבדק כנגד אלגוריתם אקראי PC (Probabilistic Covering) שאינו תלוי בסימני ניווט כלל, ועבורו תוחלת זמן הכיסוי תלויה פולינומיאלית במימדי השטח. שני האלגוריתמים מאפשרים שיתוף פעולה של מספר רובוטים להאצת תהליך הכיסוי. כמו כן נראה כי שתי השיטות יכולות להיות משולבות יחד להשגת נקודת-איזון טובה יותר בין ביצועים וגמישות. לסיום נציג מספר שאלות פתוחות.

נושאים נוספים בגיאומטריה של מערכות רב-סוכניות :

הנושאים שלהלן קשורים גם הם לתכונותיהן הגיאומטריות של מערכות רב-סוכניות, אם כי לאו דווקא לבעית כיסוי וחיפוש.

יישור קו ע"י סדרת פעולות לוקליות :

מספר סוכנים יכולים להתארגן בקו ישר ע"י ביצוע סדרה של תיקונים, המבוססים על אינטראקציה לוקלית פשוטה, וקצב ההתכנסות הוא אקספוננציאלי. מוצגת אנלוגיה בין התופעה לבין הדינמיקה של התקדמות פולס חשמלי לאורך קו תמסורת מפולג, ומועלית השערה לגבי התנהגותה של מערכת דומה עם חוק התנהגות הסתברותי .

מרדפים הסתברותיים על הסריג :

לאחרונה הוכח כי המסלולים של סדרת נמלים העורכות מרדף רציף זו אחר זו מתכנסים אל הקו הישר שבין נקודת המוצא לנקודת המטרה. בפרק זה נראה כי תוצאה דומה מתקיימת גם עבור מרדף הסתברותי על הסריג השלם. מודל זה של רדיפה מוביל לתוצאות מעניינות גם בהקשר של מרדפים קוויים ומעגליים .

תכניות הדמיה כאמצעי עזר ויזואלי לאנליזה מתמטית :

הדמיה הינה כלי מועיל לניפוי אלגוריתמים, משחק בפרמטרים ובהיוריסטיקות, והדגמת פעולתה של מערכת רב-סוכנית באופן מושך עין. מספר תכניות הדמיה נכתבו במסגרת עבודה זו, על מנת לנסות את מגוון האלגוריתמים הכלולים בעבודה. מלכתחילה נכתבו התכניות בשפות C ו - PostScript. בהמשך הזמן נוצר עומס עבודה ניכר כתוצאה מהצורך לתמוך במספר רב של פלטפורמות. מסיבה זו ואחרות , נכתבו לבסוף התכניות בשפת Java והן זמינות להפעלה דרך רשת האינטרנט באתר <http://www.cs.technion.ac.il/~wagner>

נושאים למחקר נוסף :

בסוף פרק ההקדמה באנגלית, מוצגת רשימה של נושאים אפשריים להמשך המחקר, שעלו במהלך הכנתה של עבודה זו. הנושאים כוללים היבטים שונים של תיאוריה, הדמיה ויישום של מערכות רב-סוכניות .

סיכום

מטרתי בעבודה זו היא פיתוח וניתוח של שיטות לפתרון בעיית הסריקה על ידי מערכת רב-סוכנית לא ממורכזת, על מנת לנסות ולתת למיישמי מערכות כאלו כלים להעריך מה ניתן ומה לא ניתן לצפות מהעסקת סוכנים רבים למטרה משותפת. בעיות מעשיות הינן מורכבות ביותר ונוגעות בתחומים מגוונים, ולפיכך עשויות לדרוש פתרונות המשלבים גישות אלגוריתמיות שונות. הנני מקווה כי האלגוריתמים והניתוחים של מערכות רב-סוכניות המוצגים כאן ישמשו למציאת שילוב נאות של מירכוז וביזור, ולפיתוח תיאוריות יפות ויישומים מועילים.