

שערוך מהיר של המהירות הזוויתית של לוויין ממדידות ווקטוריות.

מהירותה הזוויתית של חללית היא פיסת מידע קריטית במערכות בקרת מצב זוויתי. מידע זה משמש לצורך (1) ריסון הקצב הזוויתי, (2) יישום אלגוריתמי despin, במיוחד מיד לאחר הצבת הלוויין בחלל, (3) קידום בזמן (propagation) של המצב הזוויתי במשערכי מצב זוויתי למיניהם. באופן רגיל, נרכשת המהירות הזוויתית באמצעות מדידי קצב גירוסקופיים. אולם, גם הטובים שבמדידים מן הסוג הזה מאופיינים על ידי אמינות נמוכה. כדוגמה מובהקת ניתן להביא את טלסקופ החלל של NASA, ה-Hubble Space Telescope (HST), אשר הועבר למוד חרום בתאריך 13 בנובמבר 1999 אחר שארבעה (!) מתוך ששת הגירוסקופים שלו (באיכות הטובה ביותר שניתן למצוא) יצאו מכלל שימוש. אם להוסיף לבעיית האמינות של גירוסקופים גם את המצבים בהם חללית מסוחררת במהירות גבוהה, עקב ירי לא מכוון של רקטות דחף (thrusters), או מיד לאחר ההצבה בחלל (לפני שמערכת הבקרה הצליחה להשתלט על הסחרור הראשוני), מצבים בהם גם מדידי קצב תקינים אינם מסוגלים לעבוד עקב היכנסם לרוויה, נבין את חשיבותם של אלגוריתמים חלופיים לשערוך המהירות הזוויתית של חללית, אשר אינם עושים שימוש במדידי הקצב הבעייתיים. מוטיבציה נוספת לפיתוח אלגוריתמים כאלו נובעת מפיתוחם של לוויינים המתוכננים מראש להיות חסרי מדידי קצב, מסיבות של הורדת עלות והגדלת אמינות. דוגמה מצויינת ללוויין מסוג זה הינו ה- "עמוס-1" הישראלי, תוצרת התעשייה האווירית, לוויין תקשורת חדשני המיוחד בכך שמערכת בקרת המצב הזוויתי שלו איננה עושה שימוש במדידי קצב.

עבודת המחקר, אשר בוצעה בשיתוף עם חוקרים מן הארץ ומח"ל, מציעה סדרה של אלגוריתמים לשערוך המהירות הזוויתית של חללית ממדידות של ווקטור אינרציאלי בודד. בחלליות מסוחררות (במצב tumbling) או במצב של רכישה ראשונית לאחר שיגור, מדידות כאלו ניתנות לרכישה באמצעות חיישנים כגון מדידי שמש או מנגנומטרים תלת-ציריים. האלגוריתמים אינם זקוקים למידע על מצבה הזוויתי של החללית, וכמובן אינם תלויים בקיומם של מדידי קצב גירוסקופיים.

במשך העשור האחרון נעשו עבודות מספר לשערוך מצבה הזוויתי של חללית ממדידות ווקטוריות. רוב העבודות מציגות אלגוריתמים לשערוך המהירות הזוויתית במסגרת של מסנן כולל, המשערוך גם את מצבה הזוויתי של החללית. משום כך מציגות עבודות אלו דרישות חמורות באשר לבסיס האינפורמציה הדרוש לביצוע השערוך, שכן לשערוך מצב זוויתי נדרש, עקרונית, יותר מווקטור אחד (או, לחלופין, מדידה של ווקטור אחד במשך מספיק זמן כך שהווקטור ישתנה במשך המדידה). כך, למשל, שערוך המצב הזוויתי על בסיס השדה המגנטי של כדור הארץ בלבד מחייב משך זמן ארוך ביותר, מסדר גודל של זמן המחזור של המסלול, לוקה בדיוק נמוך, ומחייב ידיעת מיקום החללית בדיוק גבוה (מה שאיננו אפשרי לעיתים). אלגוריתמים מסוימים מבצעים, באופן אפקטיבי, גזירה של המצב הזוויתי לחישוב המהירות הזוויתית, אולם גזירה זאת מלווה, כמובן, בהגברת רעשים ואף היא מחייבת ידיעת המצב הזוויתי (מה שאיננו אפשרי בלוויין מיד לאחר הצבתו או בלוויין שנכנס לסחרור בלתי מבוקר).

לא קיימים בספרות אלגוריתמים לשערוך מהירות זוויתית ממדידות של ווקטור בודד (למשל: השדה המגנטי של כדור הארץ, או ווקטור הכיוון לשמש) אשר אינם מניחים ידיעה של מצבה הזוויתי של החללית ו/או ידיעת מיקומה בדיוק גבוה (לצורך שימוש במודל השדה המגנטי).

עבודת המחקר מציגה גישה חדשנית אשר הניבה כיתת שיטות חדשות לשערוך המהירות הזוויתית. שיטות אלו כוללות אלגוריתמים רקורסיביים סטוכסטיים (מסננים), וכן אלגוריתמים דטרמיניסטיים (single-frame) בהם ניתן (אך לא חובה) לעשות שימוש לצורך אתחול המסננים. בכל האלגוריתמים המוצגים במסגרת הגישה החדשה נמדד ווקטור אינרציאלי בודד במשך אינטרוול שערוך קצר, וממנו מופק שערוך המהירות הזוויתית.

בניגוד לשיטות הקיימות עד כה:

1. לא מונחת ידיעת מיקומה של החללית, גם במקרה בו נעשה שימוש בווקטור השדה המגנטי של כדור הארץ, משום שלא נעשה שימוש במודל השדה המגנטי. לעובדה זאת חשיבות מעשית רבה ביותר: לעיתים קרובות מודל זה איננו מדויק, הוא לוקה בחוסר יציבות עקב הפרעות כדוגמת סופות מגנטיות, והוא מושפע מאפקטים מגנטיים שיוניים של רכיבים אלקטרוניים בחללית. הצורך באכסון מודל השדה המגנטי במחשב הבקרה בחללית מהווה אף הוא גורם אפשרי של שגיאה.
2. לא מונחת ידיעת המצב הזוויתי של החללית, והוא אף איננו משוערך כחלק מן הפתרון. משום כך אין דרישות חמורות באשר לבסיס המידע הנדרש, כלומר: מדידות של ווקטור אינרציאלי בודד, כדוגמת ווקטור השדה המגנטי של כדור הארץ, מספיקות;
3. משך הזמן הנדרש לצורך קביעת המהירות הזוויתית הינו קצר ביותר (מסדר גודל של שניות בודדות). לעובדה זאת חשיבות רבה במקרה של לוויינים, כדוגמת לוויין תקשורת, אשר נכנסו לסחרור בלתי מבוקר (ומשום כך מצבם הזוויתי איננו ידוע). במקרים מעין אלו הזמן בו הלוויין איננו משמש לצורך העברת תקשורת מסחרית (או אחרת) עולה כסף רב והדרישה להשבתו המהירה של הלוויין לפעילות תקינה ברורה מאלה.

המחקר בו מדובר הוא בעל חשיבות רבה עבור טכנולוגיית החלל של מדינת ישראל, במיוחד משום שהוא עונה על הצרכים המיוחדים לנו של הקטנת עלויות והעלאת אמינות של מערכות חלל.

יהודה ארבל

פרופ' יעקב אושמן

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת אוירונאוטיקה וחלל