

סיכום פרויקט מחקר בנושא:
חקירה תלת מימדית של ביצועי מערכת לעקיבת קרקע

סמסטר חורף – שנת לימודים 2019/2020



DEPARTMENT OF AEROSPACE ENGINEERING

דוד דיין

מנחה: פרופ' משה אידן

תוכן עניינים

3.....	הקדמה
3.....	הגדרת חישוב השגיאה הרוחבית
6.....	השפעת שגיאות על הביצועים
9.....	מהלך חיפוש הבעיה
12.....	הגדרת גישות לפקודת סבסוב
14.....	בחירת החלופות
14.....	1 חלופה
17.....	2 חלופה
20.....	סיכום

בשנת הלימודים האחרונה פותחה סביבת סימולציה, לעקיבת קרקע של רחפן X על ידי מיפוי של הקרקע באמצעות לייזרים, על ידי הסטודנט עדן שזר. הפיתוח מתואר בפרויקט המחקר:

Multicopter Terrain Following Using LRFs - Eden Shazar

מטרת הפרויקט בסמסטר הנוכחי הייתה לבצע סימולציות עקיבה של מגוון סוגי קרקע, תחת שגיאות מדידה בסדרי גודל ריאליים.

במהלך הסימולציות הראשונות התגלה כי שגיאות מדידה בגדלים ריאליים גורמים למערכת העקיבה לא לעבוד, והרחפן מאבד יציבות וקורס לאחר שניות בודדות.

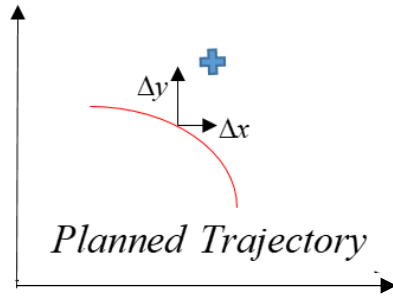
הוסק מזה שיש בעיה במימוש האלגוריתם, כך שלא ידוע באיזה מהחלקים של המימוש (שיערוך הקרקע, מימוש גיאומטרית ההנחיה, מערכת הבקרה). לכן, מטרת הפרויקט בסמסטר זה עברה להיות מציאת השגיאות במימוש המערכת, ותיקונם.

בנוסף, בוצעו כמה עידכונים בשיטת חישוב שגיאות המיקום האופקיות.

הגדרת חישוב השגיאה הרוחבית

עד עכשיו, השגיאה הרוחבית הוגדרה כערך המוחלט של השגיאה, כדלהלן:

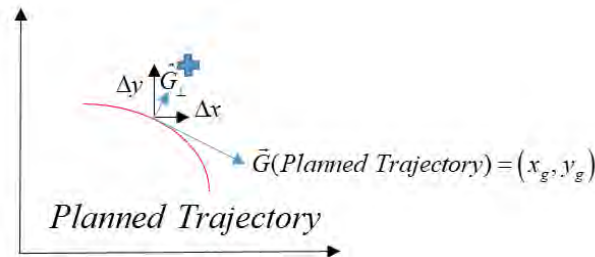
עבור כל נקודה על מסלול הרחפן, חיפוש הנקודה הקרובה ביותר בין מיקום הרחפן למסלול הרצוי, וחישוב גודל הווקטור:



$$\varepsilon_{xy} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

איור 1: תיאור הרחפן ביחס למסלול הרצוי

הוחלט להגדיר שגיאה עם כיוון, כדי לתת לה יותר משמעות בפני עצמה. לכן, הוחלט על מודל השגיאה הבא:



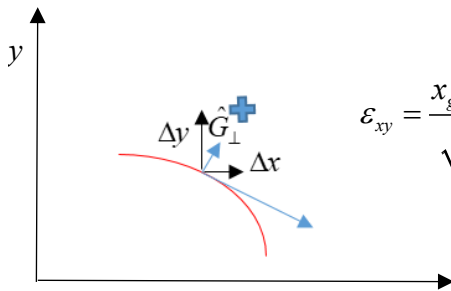
איור 2: תיאור הרחפן ביחס למסלול הרצוי ולגרדיאנט שלו

נגדיר וקטור יחידה בכיוון גרדיאנט המסלול:

$$\hat{G} = \frac{(x_g, y_g)}{\|\vec{G}\|}, \quad \hat{G}_\perp = \frac{(-y_g, x_g)}{\|\vec{G}\|}$$

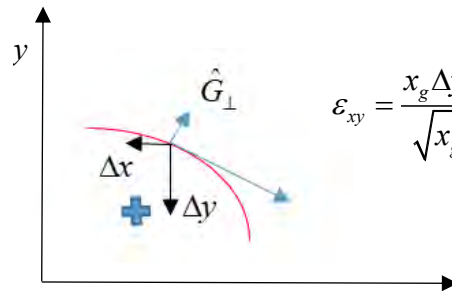
ואת השגיאה נגדיר כהיטל של הווקטור $(\Delta x, \Delta y)$ על \hat{G}_\perp :

$$\varepsilon_{xy} = \|(\Delta x, \Delta y)\| \cos\left(\angle\left[(\Delta x, \Delta y), \hat{G}_\perp\right]\right) = \langle (\Delta x, \Delta y), \hat{G}_\perp \rangle = \frac{x_g \Delta y - y_g \Delta x}{\sqrt{x_g^2 + y_g^2}}$$



איור 3: מיקום הרחפן ביחס למסלול, עבור שגיאה חיובית

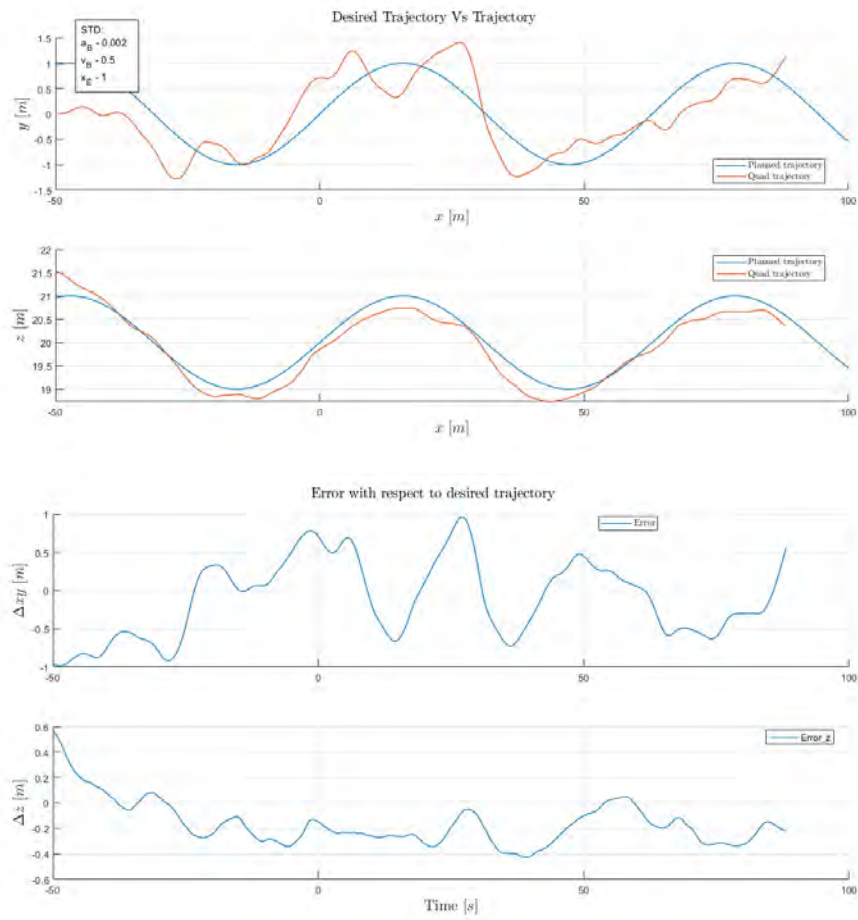
$$\varepsilon_{xy} = \frac{x_g \Delta y - y_g \Delta x}{\sqrt{x_g^2 + y_g^2}} > 0$$



איור 4: מיקום הרחפן ביחס למסלול, עבור שגיאה שלילית

$$\varepsilon_{xy} = \frac{x_g \Delta y - y_g \Delta x}{\sqrt{x_g^2 + y_g^2}} < 0$$

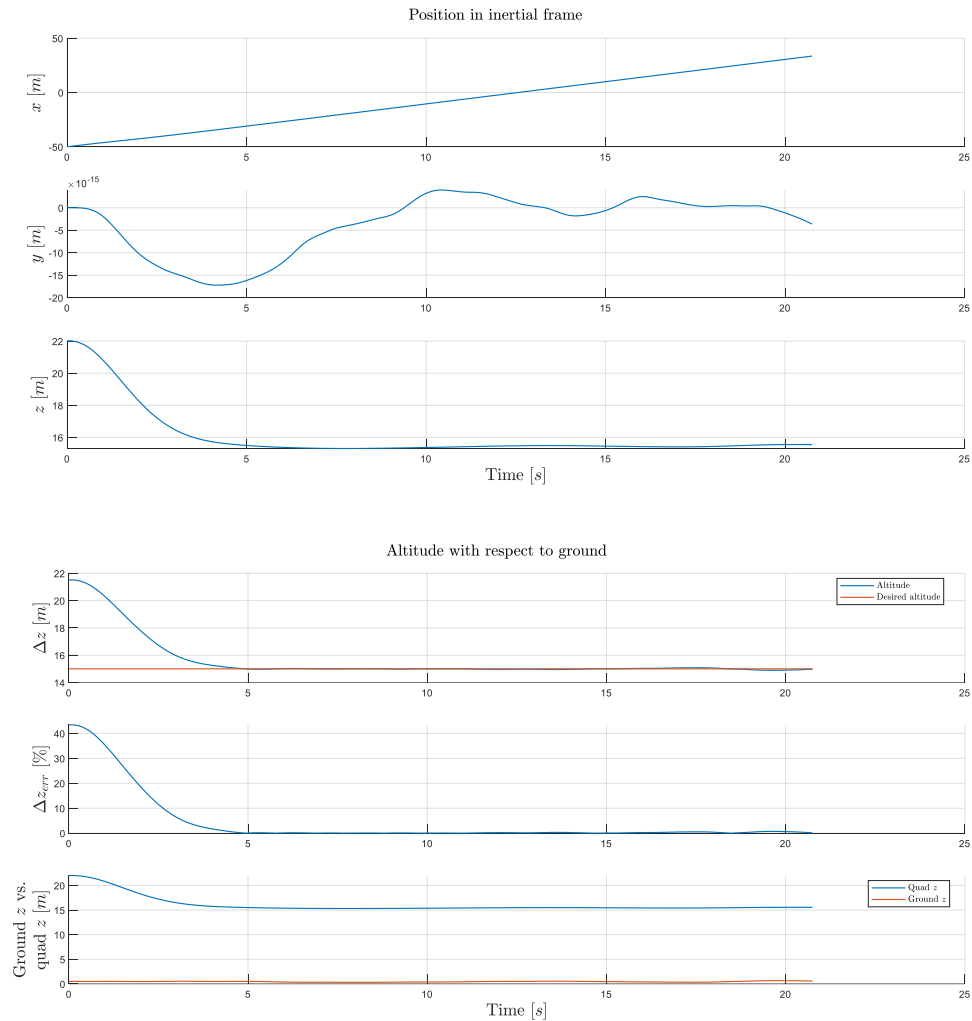
בסימוצליה לדוגמה) הוכנסו רעשי מדידה גדולים במטרה ליצור שגיאות רוחביות גדולות, כדי להמחיש את השגיאה, על מסלול מוכתב מראש, נקבל:



איור 5: הצגת שגיאות רוחביות

השפעת שגיאות על הביצועים

כאשר מבצעים סימולציה ללא שגיאות מדידה, העקיבה מתבצעת בדיוק רב, כנראה להלן:



איור 6: הצגת עקיבה ללא רעשי מדידה

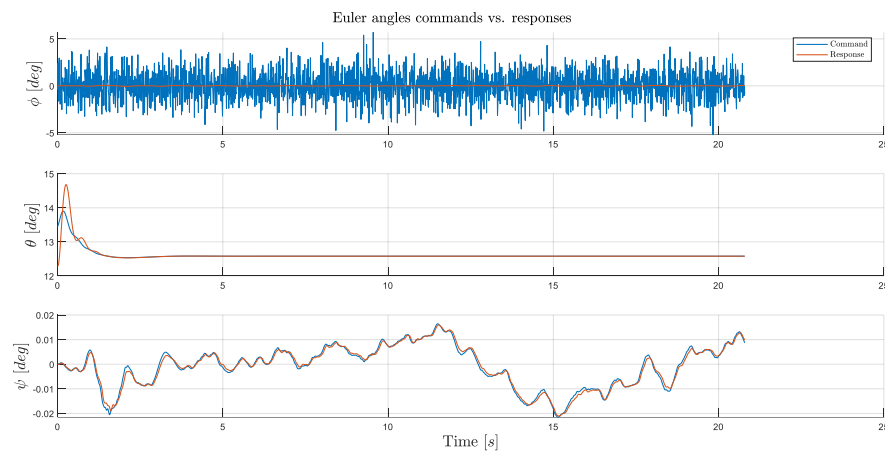
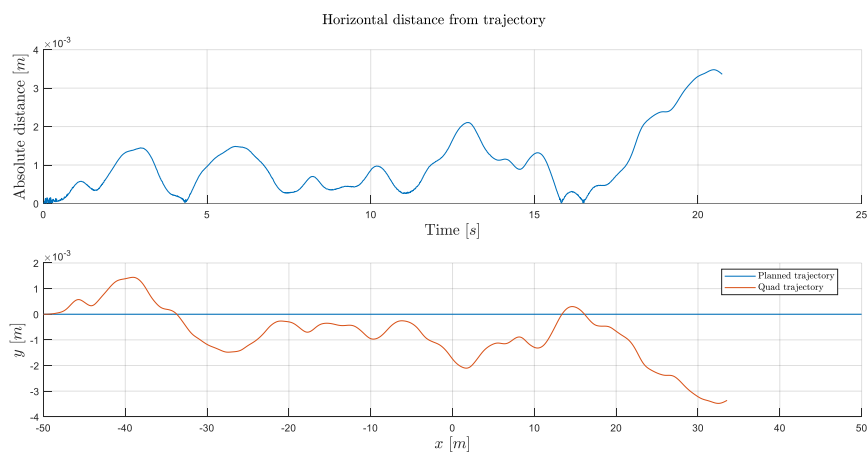
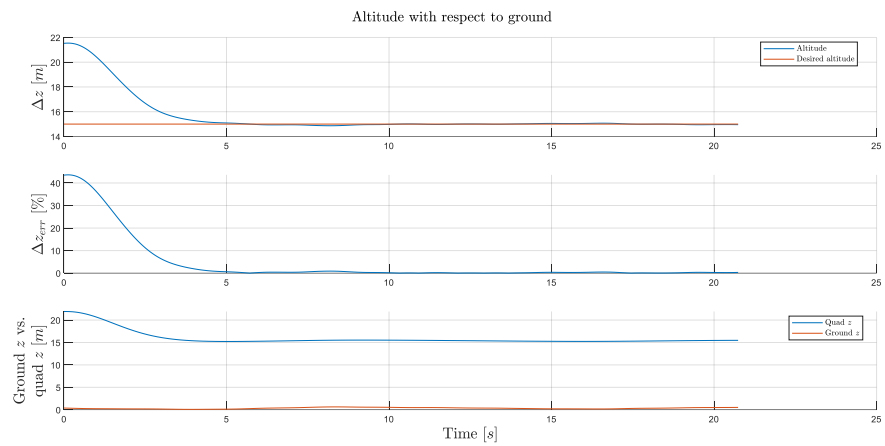
הרחפן מתחיל בנקודה שלא נמצאת על המסלול הדרוש (קו ישר על מישור XY וגובה של 15 מטר מעל הקרקע המשווערת), ומהר מאוד מתכנס אליו, ועוקב אחריו בדיוק רב.

נבחן כעת הוספת שגיאות בסדרי גודל מציאותיים. נתחיל עם שגיאת מדידת תאוצה ושגיאת מדידת מיקום (בשלושת הצירים):

Errors	LRFs	Terrain	Control	Guidance	Initial states
<input checked="" type="checkbox"/> Acceleration measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="0.002"/> G
<input type="checkbox"/> Velocity measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="0.5"/> [m/s]
<input checked="" type="checkbox"/> Position measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="1"/> [m]
<input type="checkbox"/> Euler angle derivative measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="0.3162"/> [deg/s]
<input type="checkbox"/> Euler angle measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="0.5"/> [deg]
<input type="checkbox"/> LRF range measurement noise					$\sigma =$ <input type="text" value="0.3162"/> [m]
<input type="checkbox"/> LRF installation position error					$\sigma =$ <input type="text" value="0.02"/> [m]
<input type="checkbox"/> LRF installation angular error					$\sigma =$ <input type="text" value="1"/> [deg]

איור 7: הצגת השגיאות שנבחרו

נבחן את העקיבה:



איור 8: הצגת העקיבה עם רעשי מדידה

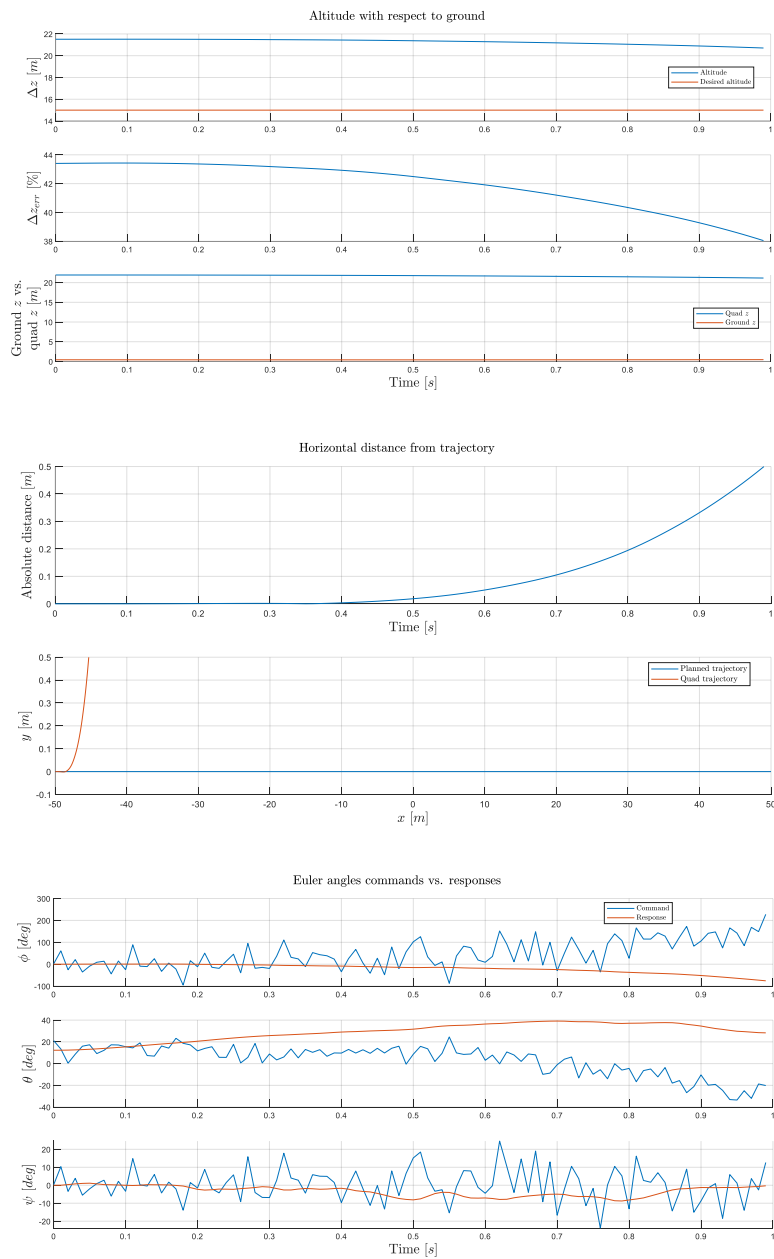
ניתן לראות ירידה קטנה בביצועי העקיבה הרוחבית.

הוספת שגיאת מדידה במהירויות:

Errors	LRFs	Terrain	Control	Guidance	Initial states
<input checked="" type="checkbox"/> Acceleration measurement noise					$\sigma = 0.002$ G
<input checked="" type="checkbox"/> Velocity measurement noise					$\sigma = 0.5$ [m/s]
<input checked="" type="checkbox"/> Position measurement noise					$\sigma = 1$ [m]
<input type="checkbox"/> Euler angle derivative measurement noise					$\sigma = 0.3162$ [deg/s]
<input type="checkbox"/> Euler angle measurement noise					$\sigma = 0.2$ [deg]
<input type="checkbox"/> LRF range measurement noise					$\sigma = 0.3162$ [m]
<input type="checkbox"/> LRF installation position error					$\sigma = 0.02$ [m]
<input type="checkbox"/> LRF installation angular error					$\sigma = 1$ [deg]

איור 9: הצגת השגיאות שנבחרו

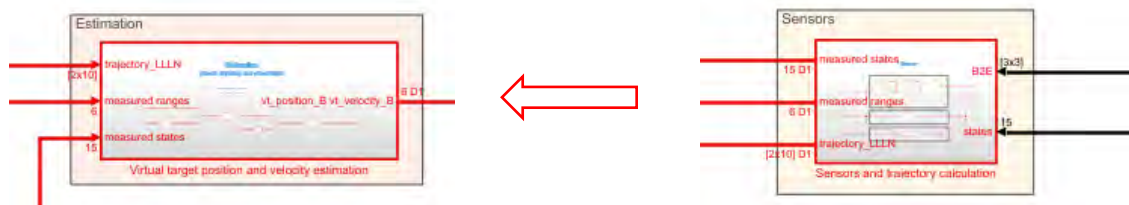
הסימולציה קורסת לאחר פחות משניה, עקב פקודות בקרה גדולות מדי של זוויות אוילר:



איור 10: הצגת העקבה עם רעשי מדידה

מהלך חיפוש הבעיה

החשש הראשוני שהועלה הוא שיש בעיה במימוש אלגוריתם ההנחיה. לכן, הוחלט לבודד את סביבת הסימולציה מאלגוריתם שיערוך הקרקע, ויצירת מסלול בגובה קבוע מעל הקרקע המשווער. במקום זה, הרחפן מקבל מסלול מרחבי מוגדר מראש. בחינת הסימולציה במצב זה הראתה שרעשי מדידה עדיין מקריסים את מערכת העקיבה, ולכן, בעית המימוש היא אכן לא באלגוריתם שיערוך הקרקע והמסלול.



איור 11: אילוסטרציה של המעבר בין בלוק החיישנים לבלוק השערוך בסביבה המקורית

בסביבה המקורית, הבלוק Sensors מקבל את סט מצבי הרחפן, ומבצע את הפעולות הבאות:

- הוספת רעשי מדידה גאומטריים
- הזזה של המסלול המוזן (במישור XY) למערכת LLLN
- מדידת טווחים של הלייזרים

הבלוק Estimation מקבל את הנתונים הללו, משערך את הקרקע בעזרת מדידות הלייזרים, וקובע מיקום על המסלול ומהירות עבור המטרה הווירטואלית.

בסביבה המבודדת:



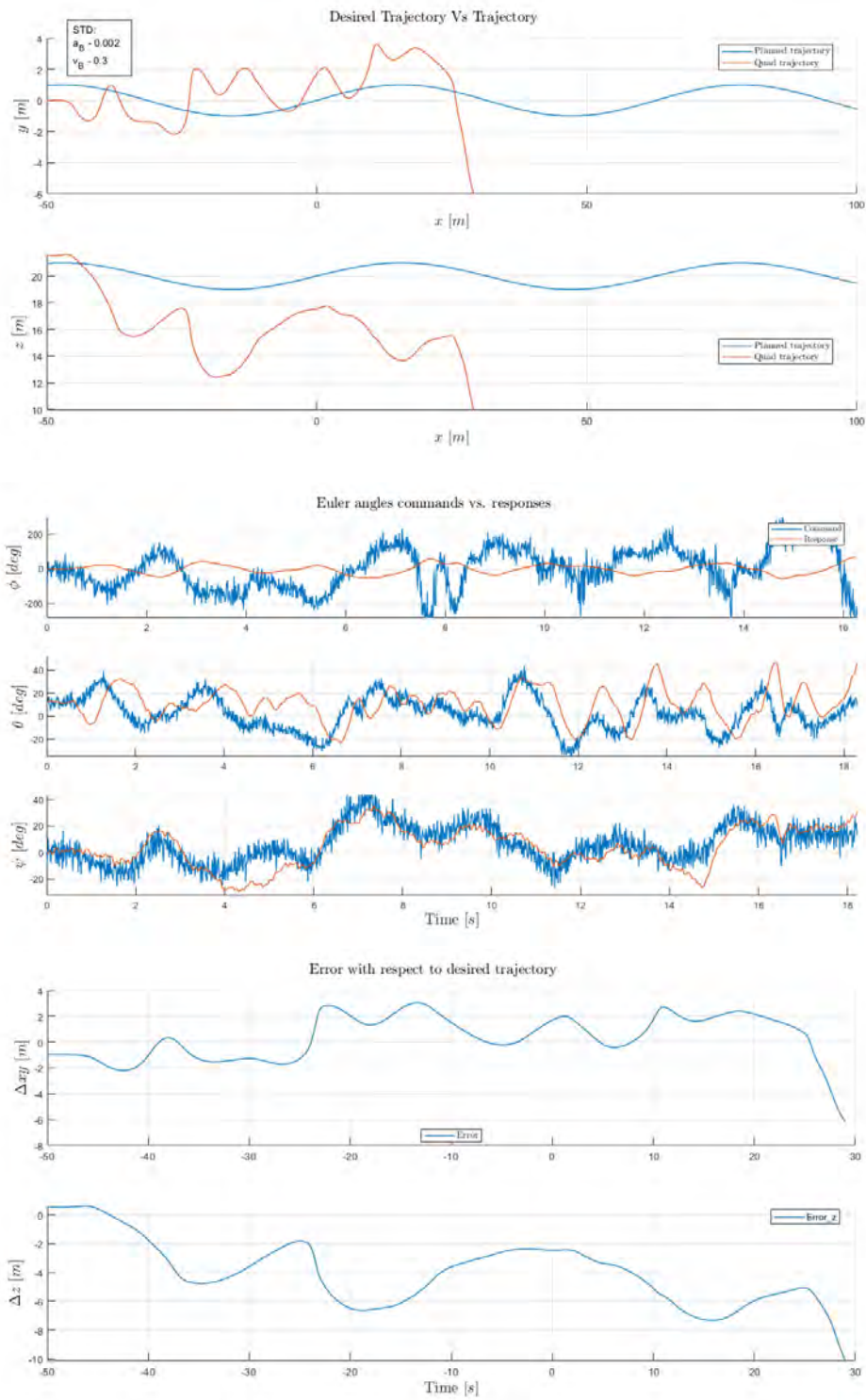
איור 12: אילוסטרציה של המעבר בין בלוק החיישנים לבלוק השערוך בסביבה המותאמת

הבלוק Sensors הומר לבלוק שמבצע:

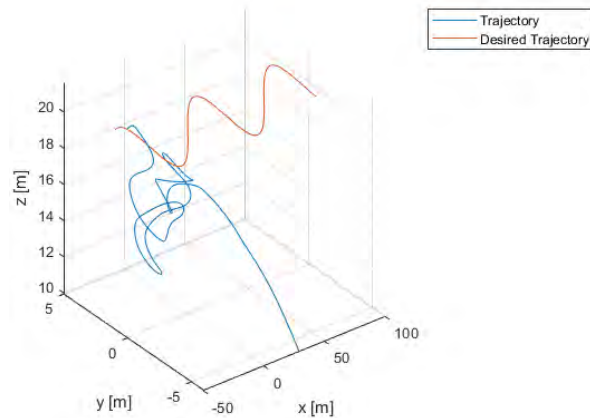
- הוספת רעשי מדידה גאומטריים
- הזזה של המסלול המוזן (במישור XYZ) למערכת LLLN

הבלוק Estimation מקבל את המסלול המוזן ומחשב את המיקום והמהירות של המטרה הווירטואלית.

הצגת סימולציה בעזרת הסביבה המבודדת:



איור 13: הצגת העקיבה עם רעשי מדידה, בסביבה המבודדת

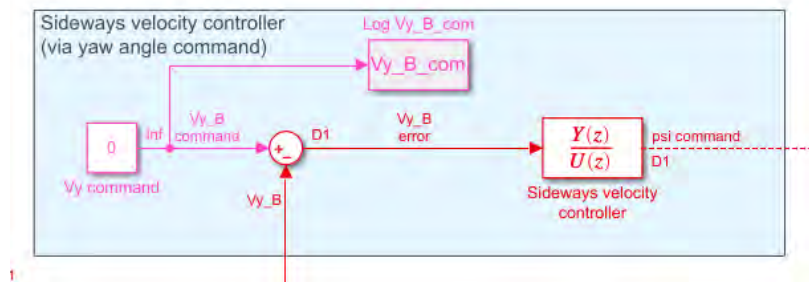


איור 14: הצגת העקיבה עם רעשי מדידה, בסביבה המבודדת, ב-3D

כפי שרואים, לא מתקבלת עקיבה טובה.

לאחר שנבדק צעד אחר צעד, אושר כי אלגוריתם ההנחיה מומש היטב. לכן, הצעד הבא הוא לבדוק את מערכת הבקרה.

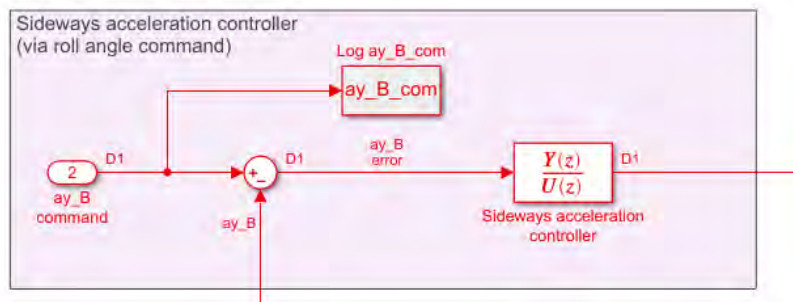
בבחינת פקודות הבקרה, הובחן כי יש התנגדות בין הפקודה על תאוצה אופקית a_y לבין הפקודה על מהירות אופקית v_y . בפיתוח הסביבה, בשנה שעברה, הוחלט לחשב פקודת זווית סבסוב על ידי פקודת מהירות אופקית אפסית. כלומר, דרישה שהרחפן לא ינוע על ציר y (בצירי גוף).



איור 15: פקודת הבקרה על זווית סבסוב

כלומר, מקבלים שגיאה במהירות בכיוון ציר y, ופקודים על זווית סבסוב (על ידי מעבר דרך פונקצית תמסורת) שתגרום למהירות סביב ציר זה להתאפס.

עם זאת, נסתכל על פקודה התאוצה האופקית, שמניבה את הפקודה על זווית גלגול:



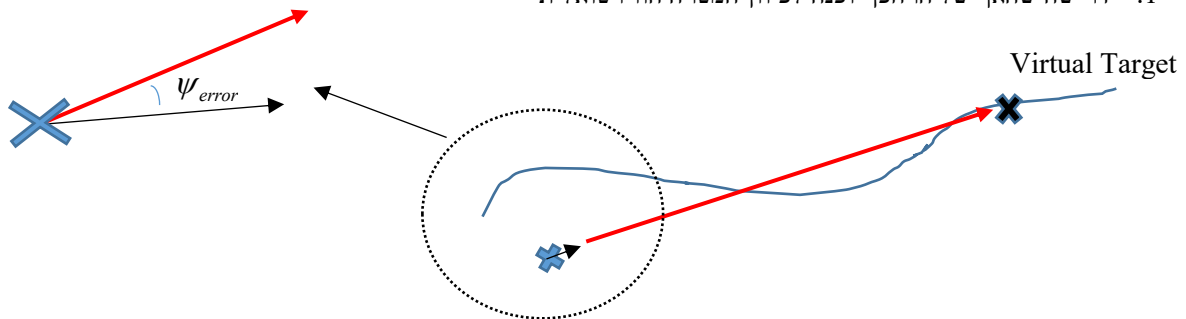
איור 16: פקודת הבקרה על זווית גלגול

מקבלים שגיאה של התאוצה האופקית, שמניבה פקודת גלגול, שמטרתה לתת תאוצה בכיוון זה, שתגרום למהירות באותו כיוון. וזה, מתנגד לפקודת המהירות האפסית שהוגדרה לעיל. כתוצאה מכך, מקבלים את ההתבדרות בפקודות זוויות אוילר ניצפו.

הגדרת גישות לפקודת סבסוב

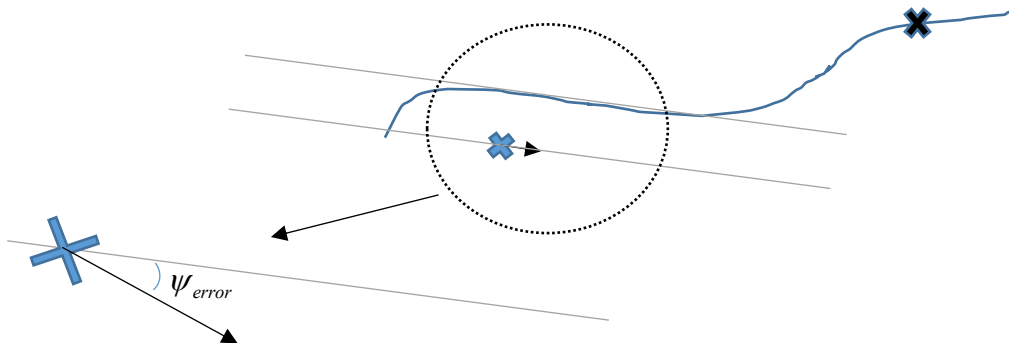
הוחלט לנסות שתי שיטות לפקוד על זווית הסבוב.

1. דרישה שהאף של הרחפן יופנה לכיוון המטרה הווירטואלית



איור 17: תיאור של גישה 1

2. דרישה שהאף של הרחפן יפנה לכיוון המקביל למשיק של המסלול בנקודה הקרובה ביותר לרחפן

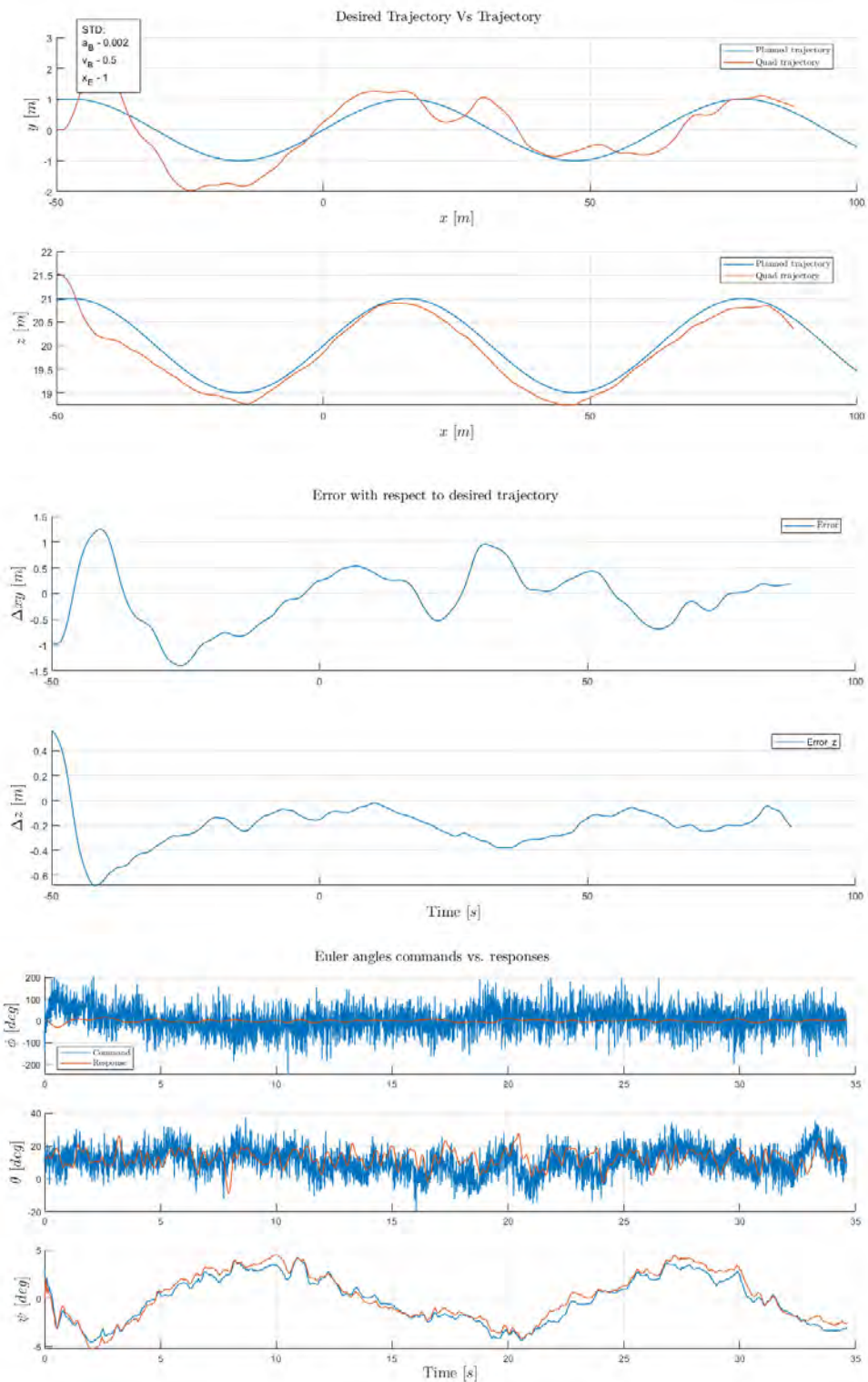


איור 18: תיאור של גישה 2

בחינת החלופות

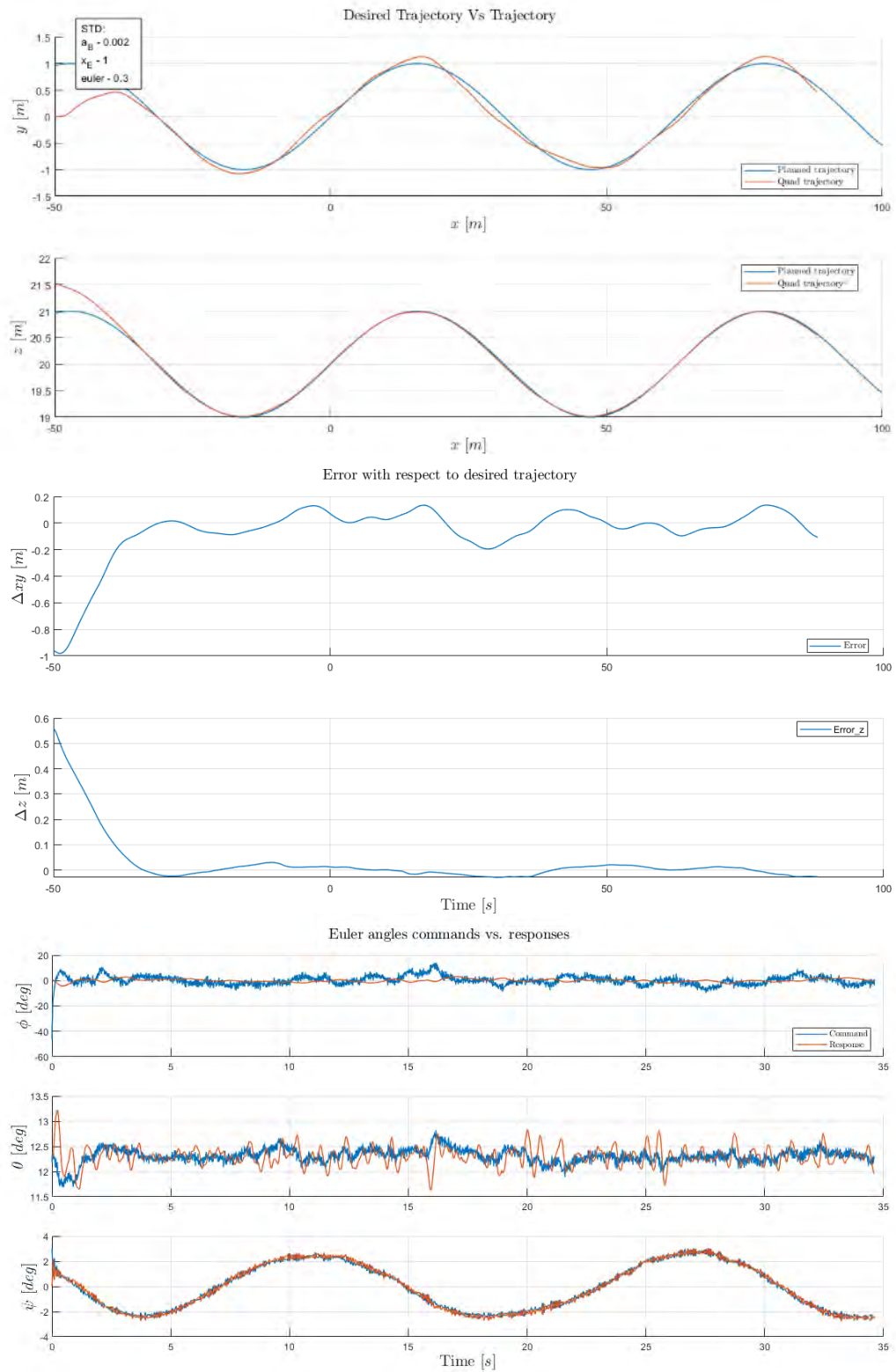
חלופה 1

לעומת מה שהוצג באיור 13, עבור אותן שגיאות, ניתן כעת לראות עקיבה טובה בהרבה:



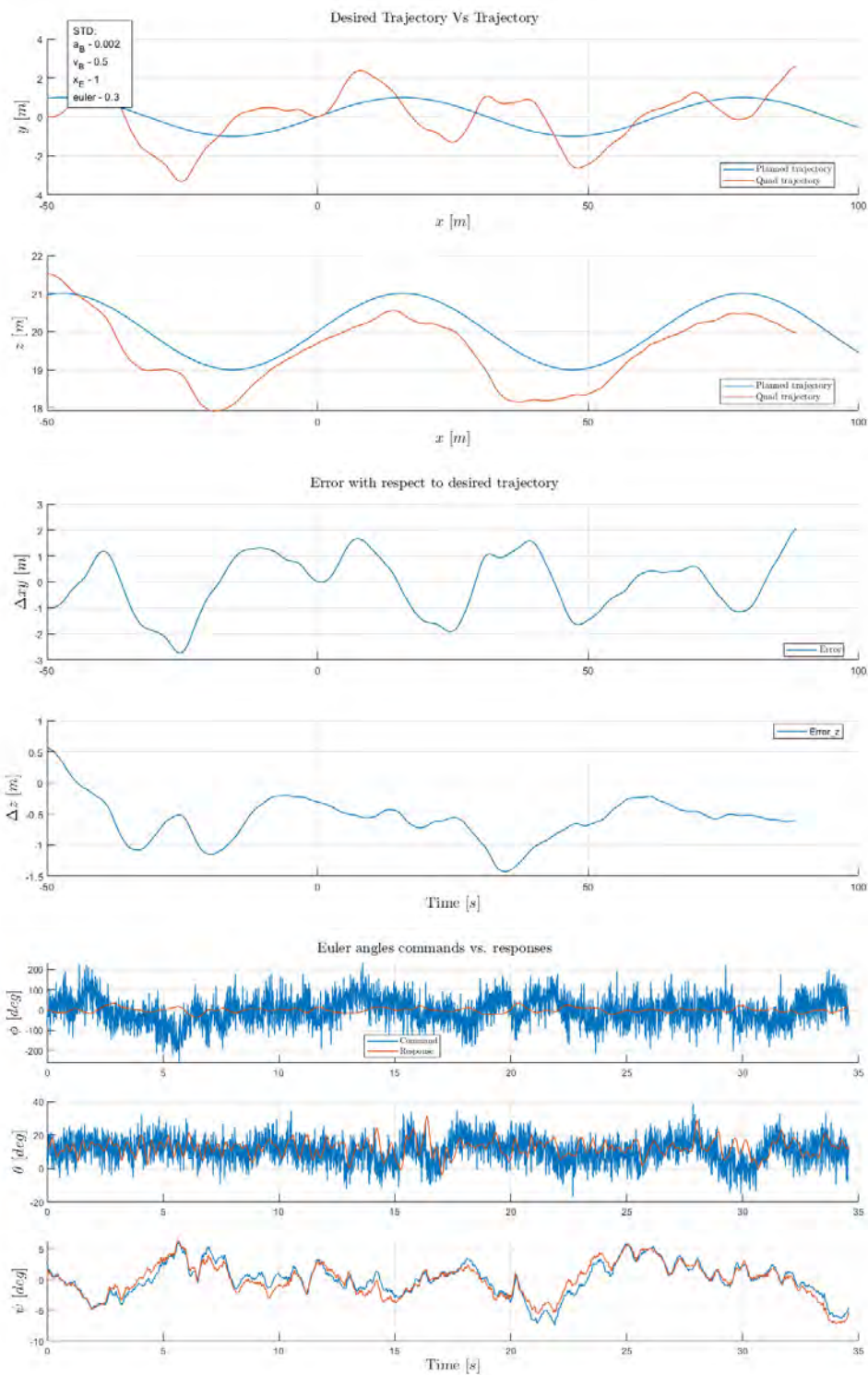
איור 19 : הצגת העקיבה עם רעשים עבור החלופה 1

עם תוספת רעשים במדידת זוויות אוילר ובלי רעשי מהירות:



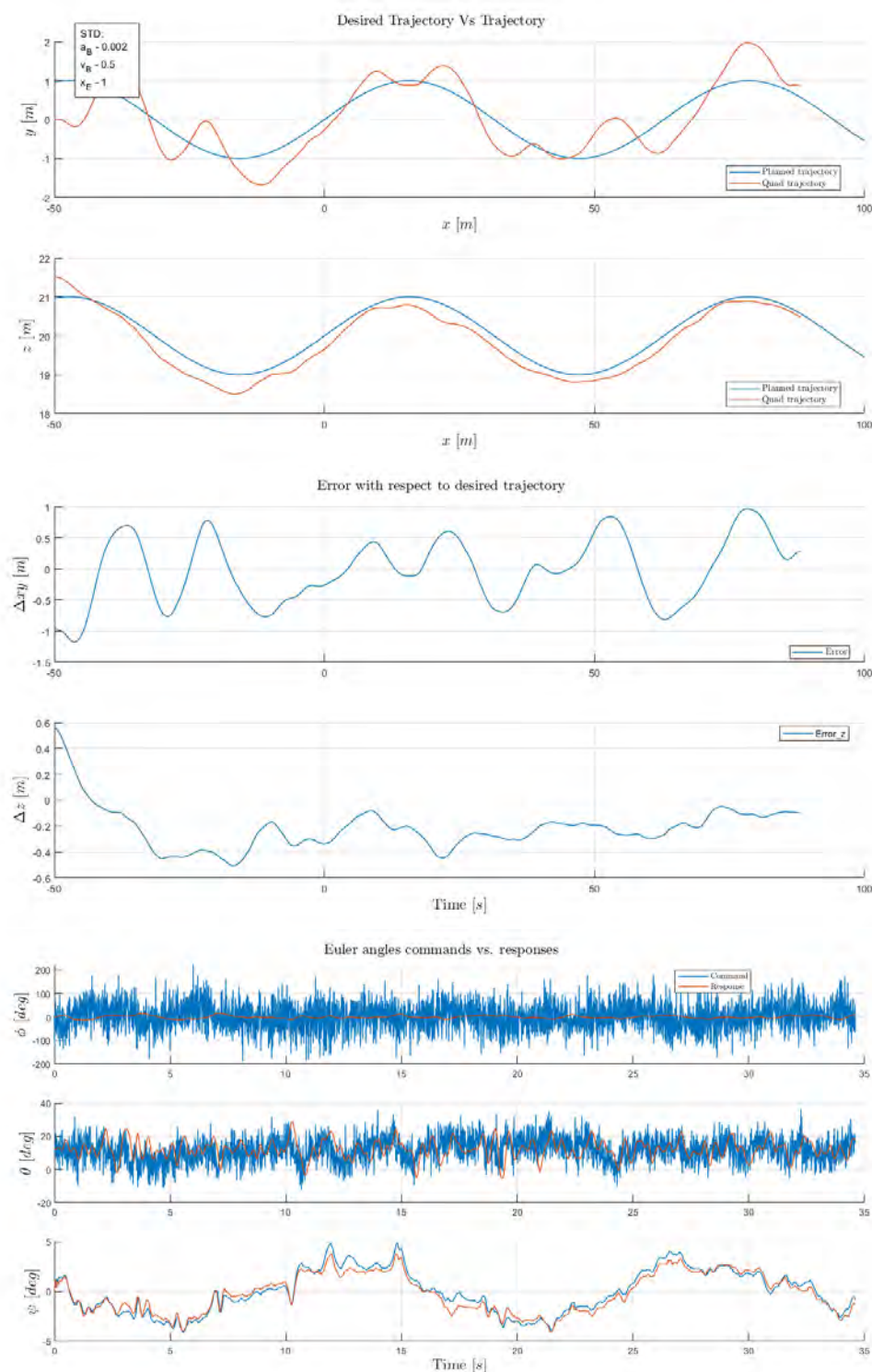
איור 20: הצגת העקיבה עם שגיאות גם בזוויות, עבור חלופה 1

כעת, עבור רעשים בכל המדידים, נקבל עקיבה לא מדויקת, אבל באופן איכותי הרחפן עדיין עוקב אחרי המסלול, ולא מתבדר כמו שקרה קודם:



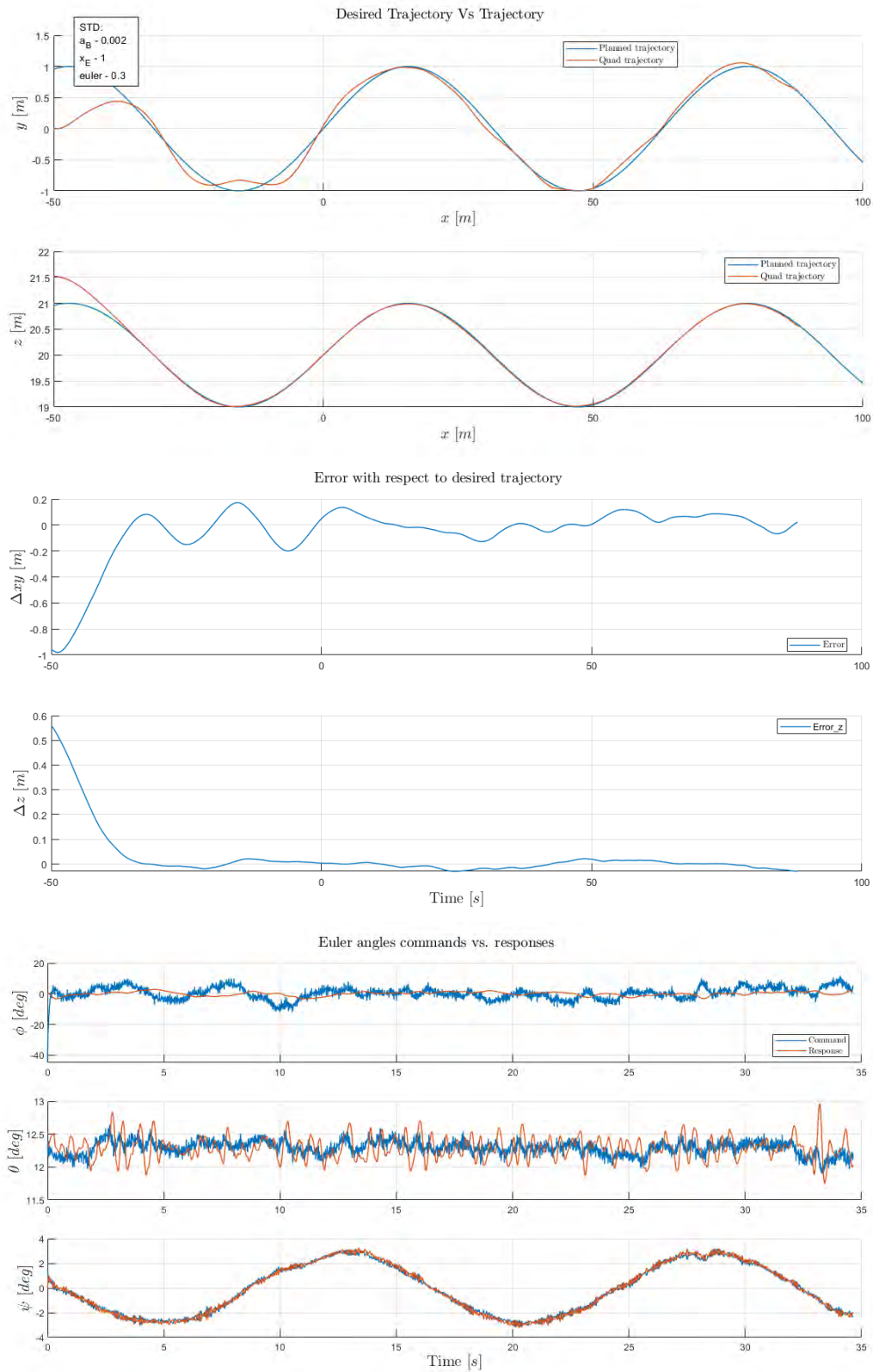
איור 21: הצגת העקיבה עבור רעשים בכל המדידים

עבור שגיאות בתאוצה, מהירות ומיקום:



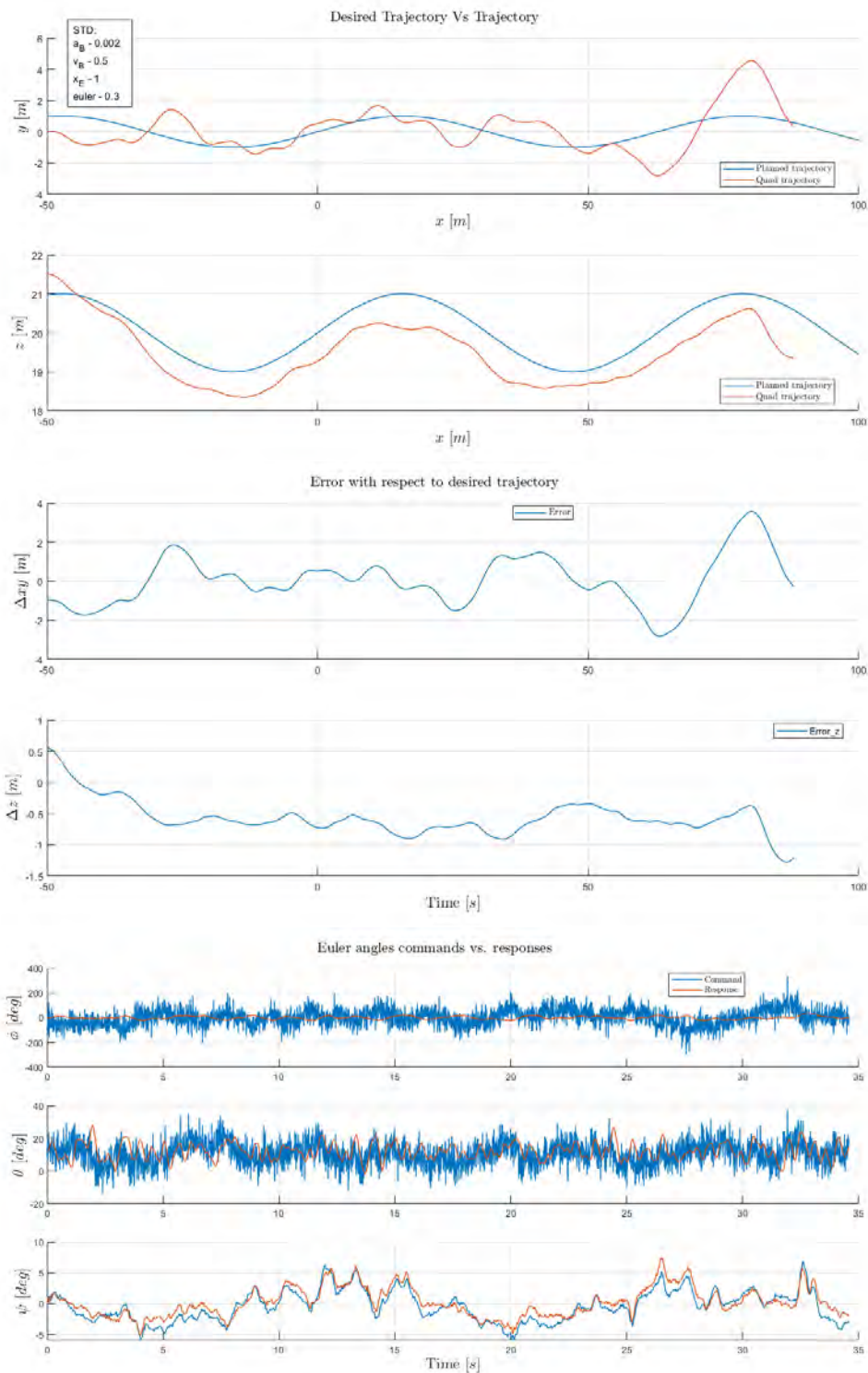
איור 22: הצגת עקיבה עבור חלופה 2 עם רעשים

עם רעשי מדידה בזוויות, ולא במהירות:



איור 23: הצגת עקיבה עם רעשי זווית, עבור חלופה 2

עם רעשים בכל המדידים:



איור 24: הצגת עקיבה עם רעשים בכל המדידים, עבור חלופה 2

עבור שתי החלופות, מקבלים עקיבה יחסית טובה כאשר מוסיפים אחד משתי הרעשים: רעש במדידת מהירות, ורעש במדידת זוויות אוילר. כאשר מוסיפים את שניהם, מקבלים עקיבה לא מדויקת, אבל בכל זאת הרחפן לא מתבדר וממשיך לנסות לעקוב אחר המסלול. לא נראה הבדל משמעותי שמצדיק בחירה באחת מהחלופות.

במהלך הסמסטר, הוגדרה וחושבה שגיאת מיקום אופקית עם כיוון.

בהמשך, נבחנה סביבת הסימולציה עד אשר נמצאה הבעיה שגרמה להתבדרות הרחפן עקב רעשי מדידה.

נמצאה כגורם הבעיה, התנגדות אינטרסים בין פקודת תאוצה בכיוון ציר y לפקודת מהירות אפסית בכיוון ציר y .

שתי גישות נוסו לפתרון הבעיה:

- פקודה על זווית סבסוב על ידי דרישה שהאף של הרחפן יופנה לכיוון המטרה הווירטואלית
- פקודה על זווית סבסוב על ידי דרישה שהאף של הרחפן יפנה לכיוון המקביל למשיק של המסלול בנקודה הקרובה ביותר לרחפן

שתיהן הניבו תוצאות דומות. מהניסויים שנעשו במסגרת עבודה זאת, לא ניתן להבחין בהבדל משמעותי בין הגישות.