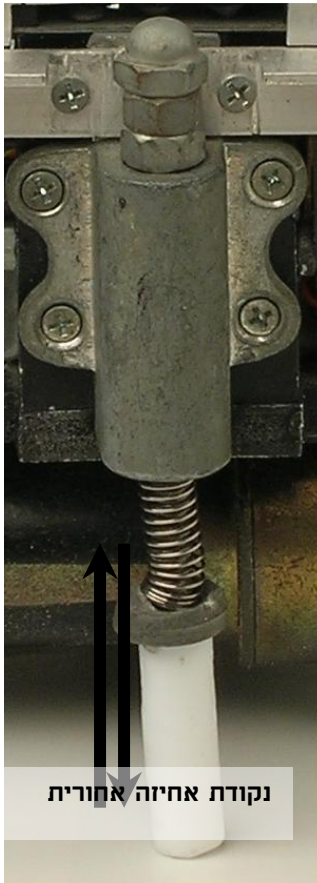




מערכת הנעת הרובוט

מבנה

ההנעה



הרובוט מונע בעזרת 2 מנועי DC בהנעה א-סינכרונית. כלומר, 2 מנועי DC ממוקמים בשני צידי הרובוט. בגלל אורכם של המנועים הוחלט לשים אותם במקביל ובעזרת תמסורת וגלגלי שיניים פשוטים, להעביר את ההנעה להנעה מרכזית. התמסורת מועברת לגלגל שיניים המורכב על גבי מוט המוחזק בשני צידיו ובסופו מורכב גלגל. באופן זה רדיוס הסיבוב של הרובוט הינו מינימאלי (מרכז הסיבוב הוא במרכז הרובוט).

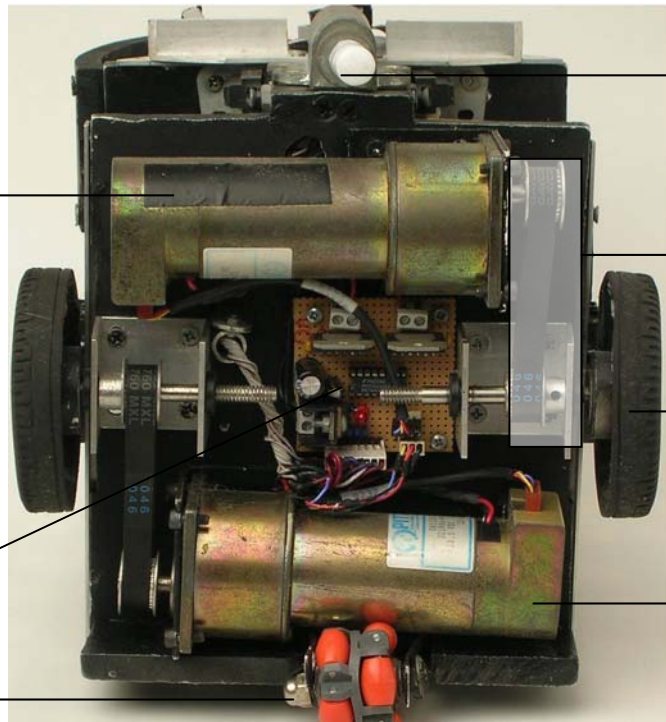
כמו כן, מכיוון ששתי נקודות הנעה אינן מבנה יציב, הוספנו נקודות אחיזה נוספות. הגלגל הקדמי הינו גלגל Omni Directional, המסוגל להסתובב בכיוון XY והנקודות אחיזה האחוריות הינה גליל טפלון (חלק לגמרי) המורכב על מוט כך שהוא מסוגל לעלות ולרדת, כנגד קפיץ המתנגד לתנועה. הסיבה העיקרית לכך היא שבהכרח 2 נקודות חייבות להיות במגע עם המשטח – נקודות ההנעה. על מנת שהמערכת תהיה יציבה, יש לספק נקודת מגע שלישית – או הקדמית או האחורית. במקרה כזה, יש לנו נקודת מגע אחת מיותרת כביכול, אך אם הרובוט מתחיל בתנועה, נקודת אחיזה אחורית תגרום לו שלא לפול אחורה וזו הקדמית תמוע ממנו להתהפך בעצירה.

על מנת שלא יקרה מצב שהמערכת יציבה – 3 נקודות אחיזה על המשטח ונקודת אחיזה נוספת – אחד מנקודות ההנעה, באוויר, נקודת האחיזה האחורית בעלת גובה מתכוונן אדפטיבי-פסיבי (בעזרת הקפיץ) ועל כן שינויים בגובה המשטח האחורי לעומת גובה המשטח בשאר נקודות האחיזה לא יגרמו למצב בו אחת מנקודות ההנעה באוויר – ועל ידי כך לגרום למצב בו הרובוט אינו מסוגל לשלוט על תנועתו.

להלן מערכת ההנעה של הרובוט הממוקמת בתחתית הרובוט:

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



נקודת אחיזה אחורית
(מפלון)

תמסורת בין המנוע
והגלגל

נקודת הנעה שמאלית

מנוע ימין

מנוע שמאל

נקודת הנעה ימנית

בקרי המנועים

נקודת אחיזה קדמית
(גלגל Omni
(Directional

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



מנועי ה-DC: נתונים ומידול

המנועים הינם מנועי DC מבית PITAMAN
נתוני הגיר:

$$\text{Ratio}=5.9:1 \quad \text{Max Load } \tau_L = 1.24_{N \cdot m} \quad \eta_{\text{GearBox}} = 81\% \quad M_{\text{GearBox}} = 167.3_{gr}$$

$$L = 34.9_{mm} \quad S_{NL} = 834_{RPM} = 87.3_{rad/s}$$

נתוני המנוע:

$$\tau_{\text{Continuous Max}} = 1.62 \cdot 10^{-3}_{N \cdot m} \quad \tau_{\text{Peak Max}} = 97.5 \cdot 10^{-3}_{N \cdot m}$$

$$\text{Motor Const.: } K_M = 11.4 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot m}{\sqrt{w}} \quad \text{No Load Speed: } S_0 = 7015_{RPM} = 734.6_{rad/s}$$

$$\text{Friction Torque: } \tau_F = 3.5 \cdot 10^{-3}_{N \cdot m} \quad \text{Rotor Inertia: } J_M = 1.91 \cdot 10^{-6}_{Kg \cdot m^2}$$

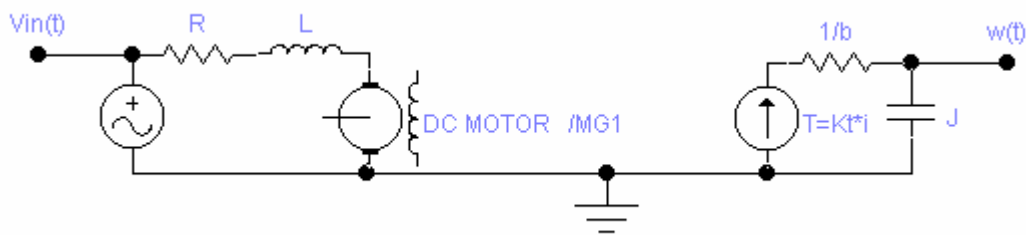
$$\text{Electrical Time Const.: } \tau_E = 0.63_{ms} \quad \text{Mechanical Time Const.: } \tau_M = 14.4_{ms}$$

$$M_{\text{motor}} = 197.9_{gr} \quad \text{Reference Voltage: } V_R = 30.3_V$$

$$\text{Torque Const. } K_T = 58.2 \cdot 10^{-3}_{N \cdot m/A} \quad \text{Back EMF const. } K_E = 58.2 \cdot 10^{-3}_{N \cdot m/A}$$

$$R_M = 3.91_{\Omega} \quad L = 4.24_{mH} \quad I_{\text{NoLoad}} = 0.13_A \quad P_{\text{peak}} = 7.74_A$$

פישוט מנוע ה-DC והמתרתו כמערכת ליניארית מכנית למערכת חשמלית, תניב את התוצאה הבאה:



מכאן גם ניתן לדעת תמסורת המנוע, אשר מורכב על הרובוט, לפי:

$$\begin{cases} J \cdot \dot{\omega}(t) + b \cdot \omega(t) = K_T i(t) \\ L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) = v(t) - K_E \cdot \omega(t) \end{cases} \xrightarrow{K_T=K_E=K} \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K/J \cdot L}{s^2 + s \left(\frac{b}{J} + \frac{R}{L} \right) + \frac{b \cdot R + K^2}{J \cdot L}}$$

נרצה לדעת את התנהגות המנוע עם העומס – שהוא הרובוט עצמו למעשה. וב- state space:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} -b/J & K/J \\ -K/L & -R/L \end{bmatrix} \underline{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ L^{-1} \end{bmatrix} V$$

$$Y = \omega \Rightarrow y = [1 \ 0] \underline{X}$$

על מנת למצוא את b (damping ratio), מדרדנו את מהירות המנוע תחת התנאים:

$$1. \text{ מצב יציב - } \dot{\omega} = 0$$

$$2. \text{ תחום המתחים } 0_{[V]} - 30.3_{[V]}$$

$$\text{ולכן: } [J \cdot \dot{\omega}(t) + b \cdot \omega(t)]|_{s.s.} = K_T \cdot i(t)|_{s.s.} \Rightarrow b = \omega^{-1} K_T \cdot i$$

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



במצב יציב מדדנו זרם של כ- 0.15 אמפר והתדירות הזוויתית היא לפי מעבר מהתדירות הזוויתית ב- 30.3 וולט, למתח ההפעלה על הרובוט של כ- 16.6 וולט:

$$b = [\omega_{measured}]^{-1} \cdot K_T \cdot i(t) = \left[\frac{v_{measured}}{r_0} \right]^{-1} \cdot K_T \cdot i(t)$$

$$= \left[\frac{40 \frac{cm/s}{4 \text{ cm}} \right]^{-1} \cdot \left(58.2 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot m}{A} \right) \cdot (0.15_A) = 8.73 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot m}{rad/s}$$

נשים לב כי התדירות הזוויתית היא זו שלאחר הגיר, של כל המנוע. הגיר מוריד את המהירות הזוויתית של המנוע ביחס של 5.9:1. כמו כן מדדנו את מהירות הרובוט וקיבלנו באופן ממוצע כ- 40 ס"מ לשנייה. רדיוס הגלגל הינו 4 ס"מ. כמו כן:

$$J = I\omega \approx M_{eff} r_0^2 \omega = (1.53_{Kg}) \cdot (0.04_m)^2 \cdot (10_{rad/s}) = 2.45 \cdot 10^{-2} N \cdot m$$

את J חישבנו לפי כך שהרובוט נשען על 2 נקודות הנעה ונקודת אחיזה נוספת בכל זמן נתון – ולכן על

כל נקודת הנעה המסה האפקטיבית הינה כשליש ממסת הרובוט - $M_{eff} \approx \frac{1}{3} \cdot 4.5_{Kg} = 1.53_{Kg}$. עם רדיוס גלגל של 4 ס"מ מתקבל כי:

תמסורת המנוע הסופית, וב- state space:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} \approx \frac{560}{s^2 + 922s + 65.5} \approx \frac{560}{(s + 0.07) \cdot (s + 921.9)} \xrightarrow{LHP} stable$$

$$\begin{cases} \dot{\underline{X}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{X}(t) + \underline{B} \cdot V \\ y = \underline{C} \cdot \underline{X} \end{cases} \Rightarrow rank(\underline{A}) = 2$$

$$\begin{cases} \dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} -0.0356 & 2.375 \\ -13.726 & -922.169 \end{bmatrix} \underline{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ 235.8 \end{bmatrix} V \\ y = [1 \quad 0] \underline{X} \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} rank \begin{bmatrix} \underline{B} & \underline{A} \cdot \underline{B} \end{bmatrix} &= rank(\underline{A}) \\ rank \begin{bmatrix} \underline{C} \\ \underline{C} \cdot \underline{A} \end{bmatrix} &= rank(\underline{A}) \end{aligned}$$

⇒ Stable & Observable

נקודת הפתיחה שלנו, לפני הרכבת בקרת המהירות, הינה, שמערכת המנוע (המורכב על הרובוט) ביחד עם התמסורת והעומס (למעשה, מסת רובוט) היו כבר מערכת יציבה ואבסרווביבילית. מכאן נוכל, ממדידת מהירות המנוע לדעת מהם פרמטרי כניסת המערכת, כניסת המהירות הזוויתית והזרם במנוע, ולמעשה גם את מתח המנוע. מדידת מהירות המנוע נעשית באופן מעשי על ידי אלקטרוניקה אופטיים, אשר פרופורציונלים (עד כדי קבוע כפלי החלוי ביחס הגיר) למהירות הזוויתית, ומכאן (על ידי רדיוס הגלגל המניע) למהירות עצמה.

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



PID : DC בקרת מהירות מנועי

בקרת המהירות של המנועים נעשה בעזרת משוב ממקודד אופטי המורכב על גבי המנוע. לפיכך

ניתן למדוד בזמן אמת את מהירות המנוע. בקרת ה- PID עבור הרובוט יושמה באופן הבא:

- בקרת מהירות – מדידת כמות אנקודרים בזמן דגימה של $T_{V1} = 8.533_{ms}$. בקרה זו הינה הבקרה העיקרית ואינה מקיימת כל קורלציה בין התיקון אותו מקבל כל מנוע של הרובוט. בקרה זו דואגת כי לכל מנוע תהיה מהירות מסוימת והתוצאה היא שהרובוט נוסע במסלול הנכון.
- בקרת הפרשי דרכים – מדידת כמות אנקודרים שעבר מנוע אחד לעומת כמות האנקודרים של המנוע השני ועוד פאזה כלשהי (נסיעה ישר משמעה נסיעה קדימה). זמן הדגימה הינו כ- $T_{V2} = 1.28_{ms}$ קיימת כאן קורלציה מלאה בין התיקונים למהירות אותה מקבל כל מנוע. בקרה זו קיימת על מנת להבטיח כי תהיה קורלציה מסוימת בין מהירות מנוע אחד ושני, שאחרי כן, על הרובוט לנסוע במסלול מסוים, וזה מחייב את שני המנועים להיות במהירויות מתואמות יחסית למסלול. הבעיות בבקרה זו היא שמכיוון שהתיקון תלוי בקריאות שני האנקודרים, ואין קורלציה בין השגיאות של קריאות כלו, השגיאה הכללית במדידה זו הינה כפולה. על כן בקרה זו הינה בחזקת Fine Tuning, תיקונים מסדר שני.

בקרת המנועים, אם כן, מורכבת מבקרה מרכזית, הנועשית עבור כל מנוע בנפרד, בזמן דגימה של $T_{V1} = 8.533_{ms}$ ומבקרה משנית, האמורה להניב תיקונים מהירים ולהגיב בצורה מהירה יותר, בזמן דגימה של $T_{V2} = 1.28_{ms}$, המשקללת את המרחק אותו עובר מנוע אחד לעומת המנוע השני (בתוספת פאזה כלשהי – פרמטר הניתן לקביעה באופן חיצוני) ובקרה זו הינה בבחינת תיקונים מסדר שני (Fine Tuning).

להלן אלגוריתם כללי של PID בזמן ובתדר וכמו כן, האלגוריתמי PID הסופיים לאחר דיסקרטיזציה, המספקים תוצר תיקון למתחי המנועים:

$$\Delta(t) = K_p^{-1} \cdot e(t) + K_I^{-1} \int_0^T e(t) dt + K_D^{-1} \cdot \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{K_p^{-1}=K} H(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right)$$

Velocity PID algorithm per motor:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_1[nT_1] = K_{p1}^{-1} \cdot e_1[nT_1] + K_{I1}^{-1} \cdot \sum_{i=0}^n e_1[iT_1] + K_{D1}^{-1} \cdot (e_1[nT_1] - e_1[(n-1)T_1]) \\ e_1[nT_1] = \omega_{ref}[nT_1] - \omega_{measured}[nT_1] \text{ This is done for each motor} \\ K_{p1} = 6 \quad K_{I1} = 750 \quad K_{D1} = 9 \quad T_1 = 8.533_{ms} \end{array} \right.$$

Displacement Difference PID algorithm for both motors:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_2[nT_2] = K_{p2}^{-1} \cdot e_2[nT_2] + K_{I2}^{-1} \cdot \sum_{i=0}^n e_2[iT_2] + K_{D2}^{-1} \cdot (e_2[nT_2] - e_2[(n-1)T_2]) \\ e_2[nT_2] = \left\{ \omega_{measured, Right}^{Motor}[nT_2] - \omega_{measured, Left}^{Motor}[nT_2] \right\} - \left\{ \omega_{ref, Right}^{Motor}[nT_2] - \omega_{ref, Left}^{Motor}[nT_2] \right\} \\ = \left\{ \omega_{measured, Right}^{Motor}[nT_2] - \omega_{measured, Left}^{Motor}[nT_2] \right\} + \varphi_{ref}[nT_2] \\ K_{p2} = 6 \quad K_{I2} = 500 \quad K_{D2} = 8 \quad T_2 = 1.28_{ms} \end{array} \right.$$

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



אלו הם התיקונים שיש להוסיף למחיי המנועים בכל זמן נתון:

$$t = nT_1 : V_{\text{Right/Left Motor}} [nT_1^+] = V_{\text{Right/Left Motor}} [nT_1^-] + \Delta_{1, \text{Right/Left Motor}} [nT_1]$$

$$t = nT_2 : V_{\text{Right/Left}} [nT_2^+] = V_{\text{Right/Left}} [nT_2^-] \mp \Delta_{2, \text{Right/Left}} [nT_2]$$

מטרת האלגוריתם הכללי הינה שכשהרובוט בוחר מסלול, בזמן אמת, הוא ייסע במסלול זה ולא יסטה ממנו. הדוגמא הכי פשוטה, כמובן, הינה נסיעה ישר, בה לכל מנוע יש מהירות רצויה וזהו הפאזה הרצויה בין מהירויות המנועים הינה אפס. כמו כן, המסלול יכול להשתנות בזמן אמת ועל כן על המערכת להסתגל מהר לשינויים בערך המטרה (Reference).

הבקרה העיקרית:

$$\Delta_1 [nT_1] = K_{p1}^{-1} \cdot e_1 [nT_1] + K_{i1}^{-1} \cdot \sum_{i=0}^n e_1 [iT_1] + K_{d1}^{-1} \cdot (e_1 [nT_1] - e_1 [(n-1)T_1])$$

- $e_1 [nT_1]$ - סיגנל הפרש בין המהירות הרצויה והמדודה. נתייחס אליה כאל השגיאה במהירות המנוע
- $K_p^{-1} \cdot e_1 [nT_1]$ - האיבר הפרופורציונלי לשגיאה במהירות
- $K_i^{-1} \cdot \sum_{i=0}^n e_1 [i \cdot T_1]$ - סכימת השגיאות במהירות מרגע ההתחלה ולמעשה פרופורציוני לשגיאה

במיקום המנוע (לדוגמא, באם היה המנוע איטי רוב הזמן, אזי סימן הסכום הינו שלילי - מיקום המנוע מפגר אחרי המיקום בו היה צריך להיות). זאת משום שסכימה זו נובעת מעצם הדגימה:

$$\begin{aligned} \text{Sample}(x_{\text{ref}}(t) - x_{\text{measured}}(t)) &= \text{Sample}\left(\int (v_{\text{ref}}(t) - v_{\text{measured}}(t)) dt\right) = \\ &= \sum_{i=0}^N \delta(t - i \cdot T) \otimes \int e_1(t) dt = \sum_{i=0}^N e_1 [i \cdot T] \end{aligned}$$

- $K_D^{-1} \cdot (e_1 [n \cdot T_1] - e_1 [(n-1) \cdot T_1])$ - הפרש בין הטעויות במהירויות בזמנים עוקבים, הוא למעשה הטעות בתאוצת המנוע:

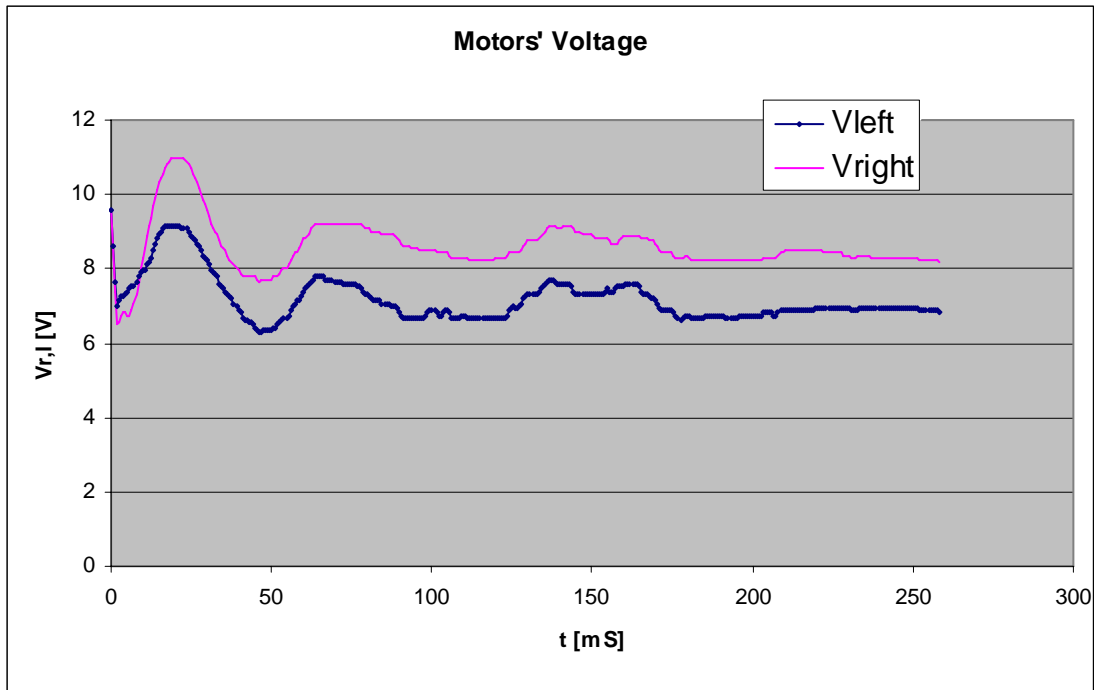
$$\begin{aligned} e_1 [n \cdot T_1] - e_1 [(n-1) \cdot T_1] &= (v_{\text{ref}} [n \cdot T_1] - v_{\text{measured}} [n \cdot T_1]) - \\ &- (v_{\text{ref}} [(n-1) \cdot T_1] - v_{\text{measured}} [(n-1) \cdot T_1]) = (v_{\text{ref}} [n \cdot T_1] - v_{\text{ref}} [(n-1) \cdot T_1]) - \\ &- (v_{\text{measured}} [n \cdot T_1] - v_{\text{measured}} [(n-1) \cdot T_1]) \square \bar{a}_{\text{ref}} \left[n \cdot \frac{T_1}{2} \right] - \bar{a}_{\text{measured}} \left[n \cdot \frac{T_1}{2} \right] \end{aligned}$$

הסכימה הכוללת של שלושת הארגומנטים האלו מהווה את התיקון שיש לבצע במתח המסופק למנוע על מנת לקרב את המהירות המדודה שלו למהירות הרצויה.

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



להלן תוצאות הבקרה, עבור מתחי שני המנועים:



אלו הן תוצאות הבקרה העיקרית בלבד. אלו הן תוצאות נסיעה של הרובוט על שטיח. ניתן לראות כי זמן ההתייצבות הוא כ- $100_{[ms]}$ ומנקודה זו מתח המנוע נהיה קבוע בקירוב. הבאנו את גרף מתח המנוע מכיוון שמכיוון שהמערכת ליניארית, מהירות המנוע פרופורציונית ליניארית למתח המנוע, ומתח המנוע בכל נקודה בזמן תלויה במהירות המנוע בשל המשוב (בקרת ה-PID). כמו כן ניתן לראות כי במנוע ימין קיימת התנגדות פנימית גבוהה יותר מבמנוע שמאל ועל כן גרף המתח שלו גבוה בכ- 1.5 וולט מעל מתח מנוע שמאל. יותר מכך, אלו הם הגרפים עבור 2 המנועים וניתן לראות כי התנהגות המערכת תחת בקרת ה-PID כמעט זהה לחלוטין עבור 2 המנועים. מכאן שהבקרה שולטת בצורה מהירה ומביאה את מהירות המנוע לערך הרצוי בזמנים סבירים (פחות משניה).

הבקרה המישונית

תפקיד הבקרה הזו היא לווסת את מהירות 2 המנועים

$$\Delta_2[nT_2] = K_{P2}^{-1} \cdot e_2[nT_2] + K_{I2}^{-1} \cdot \sum_{i=0}^n e_2[iT_2] + K_{D2}^{-1} \cdot (e_2[nT_2] - e_2[(n-1)T_2])$$

- $e_2[nT_2]$ - סיגנל הפרש בין הדרך אותה עשה מנוע שמאל למנוע ימין ועוד פאזה מסוימת, בזמן הנתון (T_2). בצורה זו ניתן לדעת האם ישנה סטייה של הרובוט מהמסלול שנקבע. אפקטיבית, מכיוון שמודדים את הפרש הדרכים בזמן נתון, השגיאה משמעה הפרש בין המהירויות המדודות של 2 המנועים. הפאזה הינה ההפרש בין המהירויות הרצויות לכל מנוע. שגיאה זו נותנת לנו מדד ישיר לסטיית הרובוט מהמסלול הרצוי.
- תוצר בקרת ה-PID הוא מתווסף תמיד למתח מנוע שמאל ויורד תמיד ממתח מנוע ימין. מכיוון שהשגיאה מחליפה סימן לפי כיוון סטיית הרובוט, בקרה זו אמורה להחזיר את הרובוט למסלול (סטיית הרובוט מימין למסלול, תגרום לעליית מתח מנוע שמאל ולירידת מתח מנוע ימין ועבור סטייה שמאלה – באופן דומה)

המדירות של בקרה זו הניבו גרף דומה לגרף הקודם, עם זמן התייצבות מעט קצר יותר, אך ללא שינוי דרמטי (מכיוון שהתיקונים הם מסדר גודל יותר קטן מאשר אלו של הבקרה העיקרית).

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



תוצרי שני בקרות ה- PID הנפרדות מוספות למתח המנוע העדכני ביותר, לאחר מעבר במסנן רוויה הבודק את המתח המתקבל. גבולות המתחים אותם אנו מכניסים למנוע נע בין 0 ל- 0.95 מהמתח המקסימאלי. מסנן הרוויה קופם כל תוצר אשר לא בגבולות האלו. להלן הקוד עבור בקרת מהירות, עבור מנוע ימין. הפונקציה ב- 2 השורות הראשונות מקבלת משתנים חיצוניים ובודקת האם לבצע את הבקרה:

```

RIGHTMOTORPID:
BRSET DIRECTION, STOPRM, LEFTMOTORPID1
BRCLR PID_STAT, VPIDR, LEFTMOTORPID
                                     באם הביים STOPRM (המצביע על עצירת מנועים), בכתובת DIRECTION הוא 1,
                                     צא מהרוטינה. באם הביא VPIDR בכתובת PID_STAT הוא 0, צא מהרוטינה

LDD RSPEED
CPD #0
LBEQ LEFTMOTORPID
SUBD Rencvpid
STD Rerror
                                     העלה את המהירות רצויה עבור מנוע ימין לצובר D והשווה ל-0
                                     אם שווה אפס, צא מהרוטינה (ולך ל- LEFTMOTORPID)
                                     חסר מצובר D את המהירות המדודה
                                     שמור במשתנה Rerror - Error
                                     העלה לצובר X את הערך של KpR
                                     חלק את D ב- X ושמור בצובר D ב- stack
                                     שמור את D בזכרון
                                     העלה ל- D את D PREV_Rerr - השגיאה הקודמת במהירות מנוע ימין
                                     חסר מ-D את Rerror, השגיאה כעת במהירות מנוע ימין

LDD PREV_Rerr
SUBD Rerror
                                     העלה ל-X את הערך של KdR, חלק את D ב-X ושמור בצובר X
                                     החזר את הערך של צובר D מה- stack
                                     הוסיף את D ל-X
                                     שמור את X ב-D ושמור את D ב- stack
                                     העלה לצובר D את תכולת RINTEGRAL מהזכרון
                                     הוסיף לצובר D את ערך השגיאה במהירות כעת
                                     שמור את תכולת צובר D בכתובת RINTEGRAL

LDD RINTEGRAL
ADDD Rerror
STD RINTEGRAL
LDX #KiR
IDIVS
PULD
LEAX D, X
XGDX
PSHD
                                     ההעלה לצובר X את הערך KiR
                                     חלק את הצובר D ב-X
                                     החזר את D מהזכרון
                                     הוסיף ל-X את D
                                     ושמור ב-D

ADDB RMOTOR
LDX #MINSPEED
EMAXD 0, X
                                     הוסיף ל-D את הערך הנוכחי של המתח הנשלח למנוע ימין (צובר D, בגודל 16 ביט מורכב
                                     מצובר A על 8 ביט בתור MS-Byte וצובר B על 8 ביט בתור LS-Byte)
                                     בדוק גבול עליון (מסנן רוויה)

LDX #MAXSPEED
EMIND 0, X
                                     בדוק גבול תחתון (מסנן רוויה)

RPID:
STAB RMOTOR
                                     שמור את הערך שהתקבל במתח הנשלח למנוע ימין

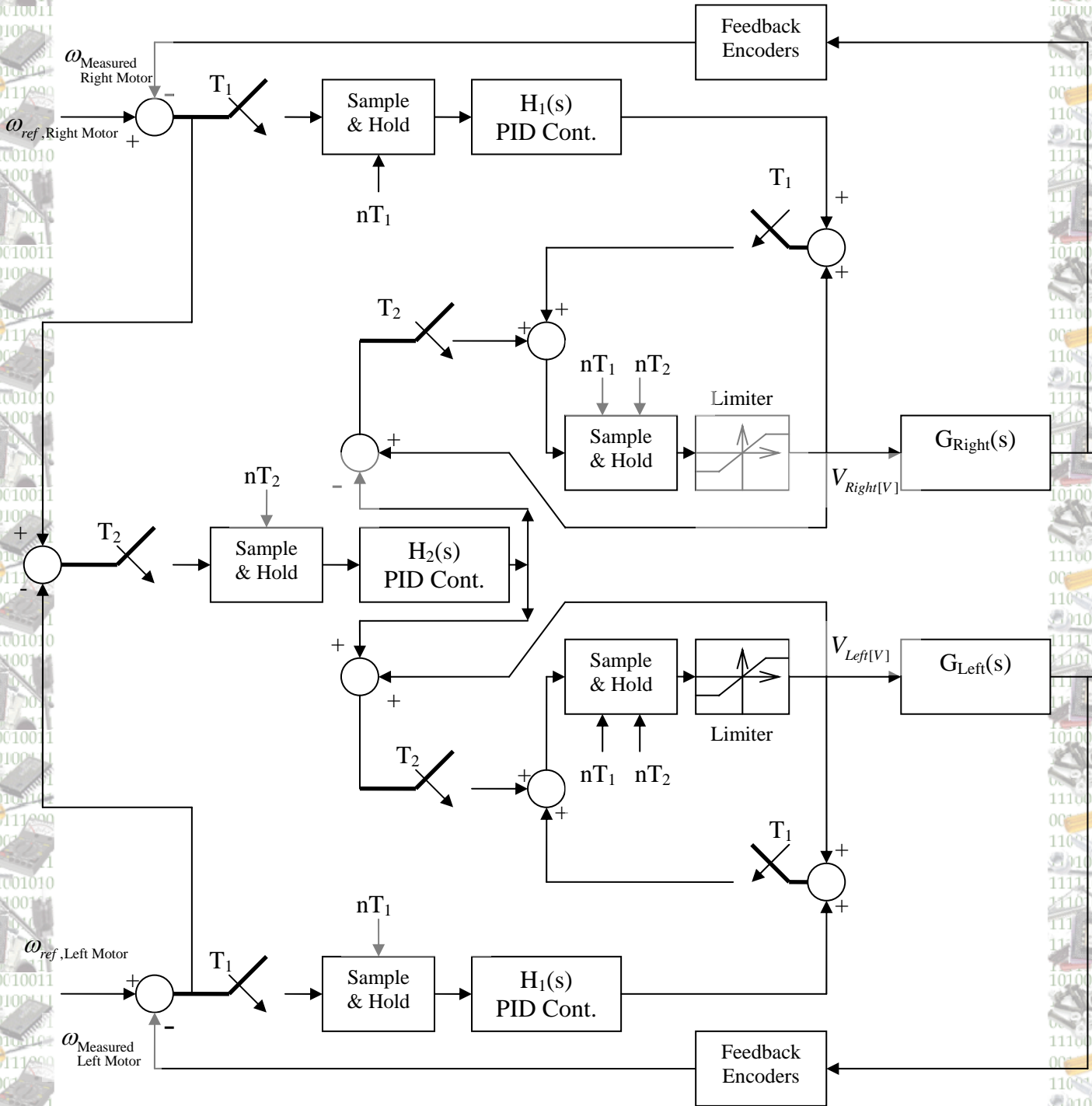
```

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



להלן דיאגרמת הבלוקים השלמה של מערכת בקרת ה-PID הכוללת:



- יש לשים לב כי ה- Sample & Hold מקבל כניסות גם את זמני הדגימה.
- לכל מנוע יש מערכת בקרת מהירות PID עצמאית – כלומר PID למנוע שמאל ו- PID למנוע ימין.
- למערכת הרובוט הכוללת קיימת מערכת בקרת הפרשי דרכים PID והתוצר שלה משותף לשני מנועי הרובוט.

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



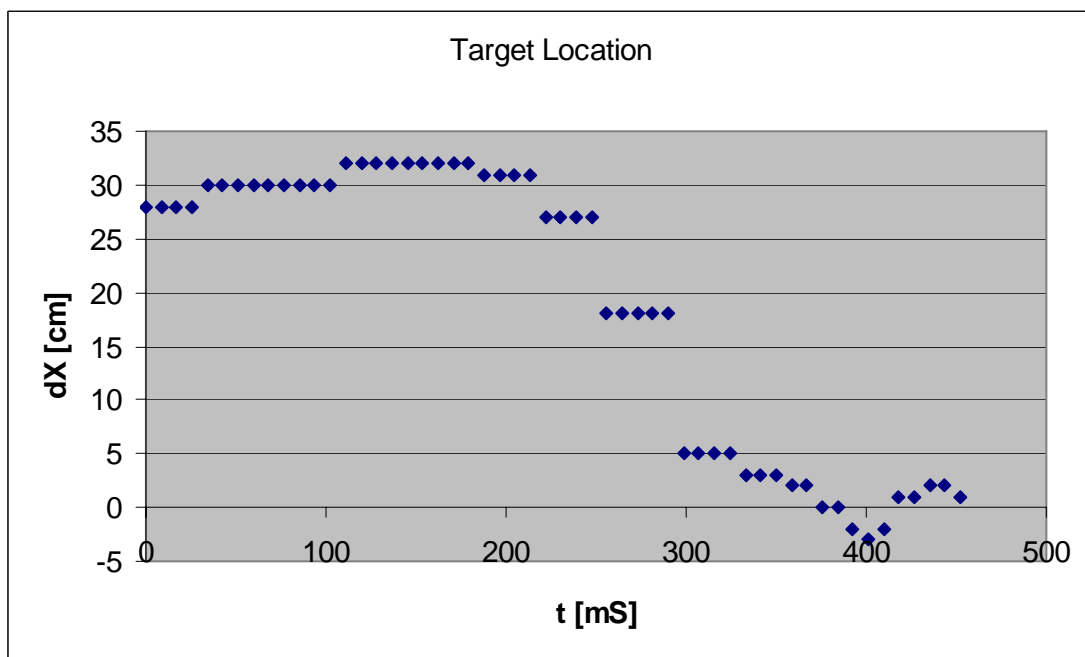
בקרת תנועה מרחבית בעזרת הראיה הסטריאוסקופית

מטרת הבקרה הזו הינה התמקדות הרובוט על המטרה תוך כדי נסיעה קדימה. הבקרה מסתמכת על קבלת סטיית המטרה מן הקו המתחיל ממרכז הרובוט והעובר בנקודה הנמצאת בדיקו בין שתי המצלמות, כלומר, מרכז קדמת הרובוט וממשיך הלאה. באם המטרה (ובמקרה זה – הנר) נמצא על קו דמיוני זה, השגיאה במיקום המטרה הוא אפס. סטייה ימנית או שמאלה מכך תניב שגיאה שלילית או חיובית, בהתאמה. על מנת למקד את הרובוט בזמן אמת, תוך כדי נסיעה, על הנר, על מנת להביא למינימום את שגיאת המיקום המטרה, כפי שנוראית דרך מצלמות הרובוט, יושמה בקרה פרופורציונלית בלבד (מפני שתוצאותיה היו מספקות). השגיאה מוגדרת לפי:

$$\Delta x = x_1 - \frac{b}{2} = \frac{d}{2} (\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2))$$

הבקרה אינה משונה ישירות את מחחי המנועים, אם כי עובדת סביב נקודות עבודה של המהירויות הרצויות הנשלחות למנוע, שהן משמשות כמטרה לבקרת המהירות (PID) של מנועי ה-DC. בקרה מקבלת את הסטייה של המטרה מקו האמצע ומחלקת אותה בקבוע פרופורציה. באם השגיאה המנורמלת שלילית, היא מוסיפה אפס למהירות הרצויה המרכזית של מנוע ימין, ומוסיפה את השגיאה המנורמלת למהירות הרצויה המרכזית של מנוע שמאל. באם השגיאה המנורמלת חיובית (או אפס), נעשה דבר זהה, רק בהחלפת המנועים.

על מנת לבדוק תוצאות הבקרה, באופן דומה לדגימות הקודמות, שמרנו, בזמן אמת, את מיקום המטרה בזיכרון, עד אשר הגיע הרובוט אל המטרה, ועיבדנו את התוצאות באקסל. בקרה זו הינה גסה יחסית, אך מביאה לתוצאות מספקות, שכן רצינו כי הרובוט יגיע אל סביבה קרובה אל הנר, וכל עוד הנר נמצא בזווית מרחבית התחומה בתוך הזווית המרחבית הנוצרת על ידי עדה הראיה של המצלמות, אזי התוצאות מספקות. תוצאות הניסוי, הכללו חיפוש נר ממרחק מטר וחצי הניבו את התוצאות הבאות:



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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



ניתן לראות כי ככל שהרובוט מתקרב למטרה יותר ויותר, גם טעות המדידה יורדת, כלומר מיקום הנר יחסית למרכז הרובוט נעשה יותר מדויק, שכן במרחקים גדולים – $\tan()$ הינו מאד קרוב לכל המרחקים. לכן ניתן להסביר את הקווים האופקיים במרחקים גדולים, תוצאה של $\tan()$ מאד דומים עבור מרחקים גדולים דיו, ועבור מרחקים קצרים, \tan מתחיל להתנהג בצורה יותר ליניארית, ועל כן ניתן להתחיל לראות שינויים מהירים יותר בדגימת dX . כמו כן, התוצאות מספקות למדי, שכן ניתן לראות כי הרובוט נע לכיוון הנר בצורה כזו, שבהגיעו לנר, הנר היה ממש מול מרכז הרובוט, בסמייה של עד כמה סנטימטרים בודדים. בשלבים האחרונים, ניתן לראות התנהגות סינוסואוידלית של מיקום הנר סביב קו המרכז, או יותר נכון, תנועה מרחבית של הרובוט קדימה, בצורה סינוסואוידלית, אך על קו ישר.

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

© כל הזכויות שמורות לאסף פוניס, גיא יונה ואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר