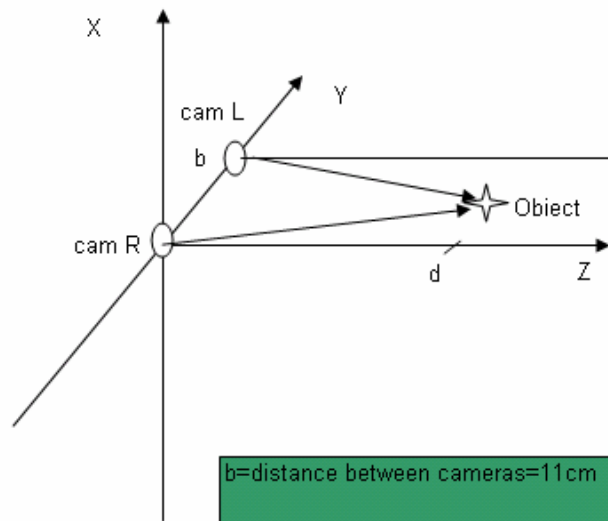




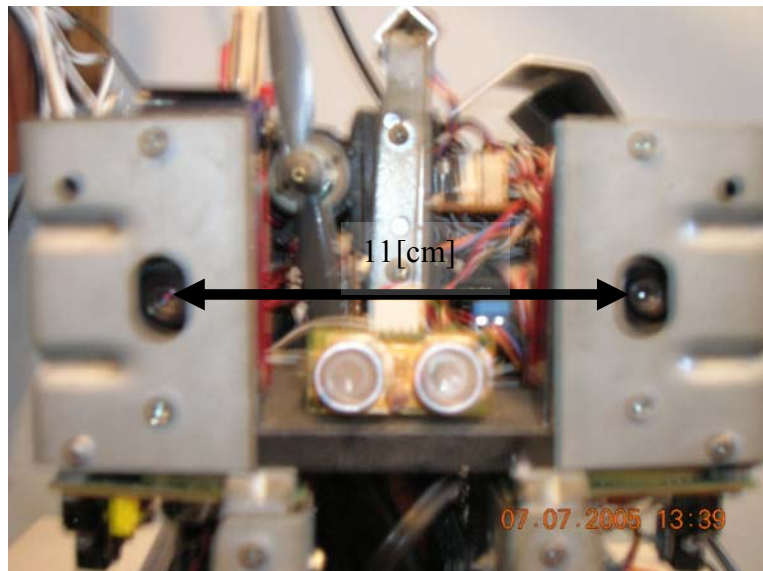
אלגוריתם הראיה הסטריאוסקופית

הפיתוח המתמטי של האלגוריתם

בכדי להוציא מידע על גודל גוף מסוים שאותו אנחנו מחפשים, נרצה לדעת את זווית המפתח ראייה של הרובוט. כלומר, מהו סך גודל הזווית שהרובוט מסוגל לראות ולקבל ערכים סבירים. בנוסף, בכדי לדעת את מרחק הרובוט מוגף מסוים, נרצה לדעת לתרגם את הערכים שאנחנו מקבלים מכל מצלמה בנפרד – לערכים אמיתיים של מרחק. מערכת הראיה על הרובוט נראית כך:



b=distance between cameras=11cm

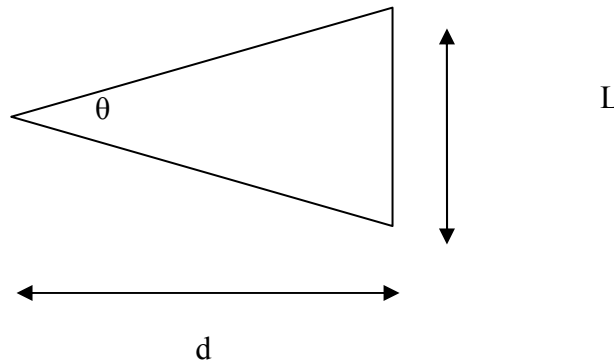


בעלי אתר הרובוטיקה הישראלי לא ישאו באחריות כלשהי לכל נזק, כספי או אחר שייגרם במישורין או בעקיפין משימוש במידע המצוי באתר זה

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

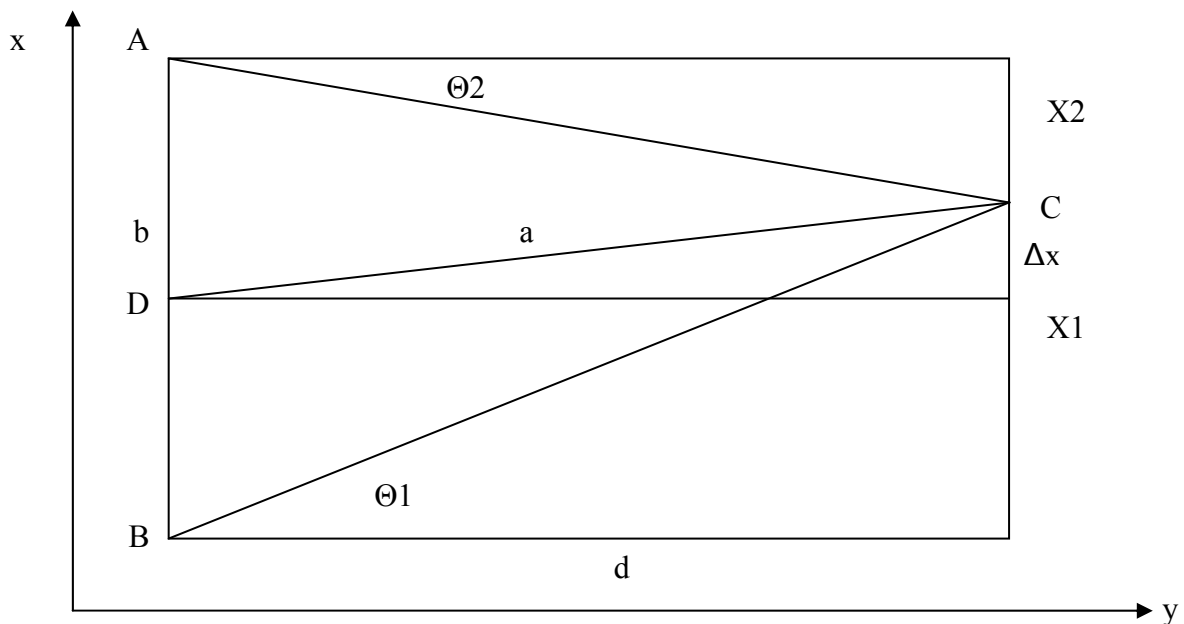


לכל מצלמה ניתן להגדיר מפתח בצורה הבאה:



כאשר θ היא זווית המפתח של הראייה אותה נמדוד. d הוא מרחק הרובוט מהגוף.
 L הוא סך האורך שהמצלמה מסוגלת לראות במרחק d .
 בנוסף, נרצה לדעת למדוד מרחק של גוף מהרובוט, בעזרת שתי המצלמות.

כעת על מנת לחשב מרחק מאובייקט מסוים, בנינו את אלגוריתם הראיה הסטריאוסקופית לפי המבנה הפשוט הבא:



כאשר:

- A – מיקום המצלמה השמאלית של הרובוט
- B – מיקום המצלמה הימנית של הרובוט
- C – מיקום הגוף ממנו אנחנו רוצים לחשב מרחק
- D – המרכז בין שתי המצלמות.
- d – המרחק של הגוף מהרובוט אותו אנחנו רוצים לחשב (בציר ה y)
- θ_1, θ_2 – הזוויות בהן רואה כל מצלמה את הגוף
- b – המרחק בין שתי המצלמות (ברובוט)
- a – המרחק של הגוף ממרכז 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



מתקיים:

$$\tan(\theta_1) = \frac{x_1}{d} \quad \tan(\theta_2) = \frac{x_2}{d}$$

$$d = x_1 \tan(\theta_1) = x_2 \tan(\theta_2) \Rightarrow x_1 = x_2 \left(\frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1)} \right)$$

המרחק בין שתי המצלמות:

$$x_1 + x_2 = b$$

ובהצבה:

$$\left(\frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2)} \right) x_2 + x_2 = b \Rightarrow \left(\frac{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2)} \right) x_2 = b \Rightarrow \left(\frac{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)}{\tan(\theta_2)} \right) x_2 = b$$

$$x_2 = \left(\frac{\tan(\theta_2)}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)} \right) b$$

ובאופן דומה:

$$x_1 = \left(\frac{\tan(\theta_1)}{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_2)} \right) b$$

ולכן המרחק:

$$d = \left(\frac{x_2}{\tan(\theta_2)} \right) \xrightarrow{x_2 = b \cdot \tan(\theta_2) / (\tan(\theta_2) + \tan(\theta_1))} d = \left(\frac{b \cdot \tan(\theta_2) / (\tan(\theta_2) + \tan(\theta_1))}{\tan(\theta_2)} \right) b$$

$$d = \left(\frac{b}{\tan(\theta_2) + \tan(\theta_1)} \right)$$

ורצה לבנות טבלה שתמיר כל ערך שהמצלמה רואה למנגס הווית המתאימה. מכיוון שאנחנו מתעסקים רק עם מספרים שלמים, בוצעה ההכפלה ב-100 ואז נעגל למספר שלם.

b הוא מספר קבוע וידוע (המרחק האמיתי בס"מ בין המצלמות, במקרה שלנו 11 ס"מ), ולכן בכל רגע נתון, נקבל ערך (רק בציר הרלוונטי) ונמיר אותו בעזרת הטבלה ל-100 פעמים טנגנס הווית הרלוונטית ואז נחשב את המרחק של הגוף מהרובוט. לכן הגדרנו פונקציות מנורמלות ומהן:

$$F(\theta_1) \equiv 100 \cdot \tan(\theta_1) \quad B \equiv 100 \cdot b$$

$$d = \frac{B}{\sum_i F(\theta_i)} = \frac{B}{F(\theta_1) + F(\theta_2)}$$

כמו כן, ניתן לראות בדיאגרמה את המרחק Δx וניתן לראות כי:

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

$$a = \sqrt{(\Delta x)^2 + d^2} \Rightarrow a = d \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{4} (\tan(\theta_1) - \tan(\theta_2))^2}$$

זהו המרחק של הגוף מהרובוט.

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 וואלי קולברג
אין להעתיק תכנים מאתר זה ללא רשות בכתב ממנהלי האתר



באופן פרקטי, התכנות התבצע באסמבלי ועל כן לא קיימת חבילה חיצונית של מתמטיקה מלבד הפעולות החשבוניות הבסיסיות. על מנת לדעת מרחק זה בקירוב טוב, מרחק זה חושב על פי, ולפי התנאים:

$$\Delta x \leq 2_{[cm]} \quad d \geq 10 \cdot \Delta x$$

$$a = \sqrt{(\Delta x)^2 + d^2} = d \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2} = d \cdot f\left(\frac{\Delta x}{d}\right)$$

$$\frac{a}{d} \cong f^{(0)}(0) + \left(\frac{\Delta x}{d}\right) \cdot f^{(1)}(0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2 \cdot f^{(2)}(0) + \frac{1}{3!} \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^3 \cdot f^{(3)}(0) + \frac{1}{4!} \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^4 \cdot f^{(4)}(0)$$

$$f\left(\frac{\Delta x}{d}\right) = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2} = f\left(-\frac{\Delta x}{d}\right) \Rightarrow \text{symmetrical} \Rightarrow f^{(m)} \begin{cases} = 0 & m = 2n + 1 \\ \neq 0 & m = 2 \end{cases}$$

$$a \cong d \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^4 \right\}$$

כמוכן שבגלל הצורך לעבוד עם מספרים שלמים, הפונקציה המנורמלת (המחושבת בזמן אמת):

$$a \cong \frac{1}{d^3} \left\{ d^4 + \frac{1}{2} (\Delta x \cdot d)^2 + \frac{1}{8} (\Delta x)^4 \right\}$$

לאחר פיתוח המשוואות, ביצענו מדידות, כאשר שמנו גוף מדידה (נר) והוצאנו נתונים מכל מצלמה - איפה היא רואה את הנר - כלומר, מהו הערך המוחזר עבור כל נקודה, ומהו המרחק האמיתי (x_1, x_2) .

עבור הערכים המוחזרים, במדידת N מדידות, בפשטות קיבלנו כי $\langle x \rangle = E\{x\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ והווריאנס

התקבל כ- $\sigma^2 \approx 1_{\#pixels} / 50_{cm}$. יש לציין כי למעשה הציר האופקי של המצלמות הן ציר Y שלהן, והמצלמות מוקמו בצורה זו, משום שהרזולוציה בציר זה של המצלמה הינה כפולה.

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



מדירות ודגימות המצלמות

להלן המדידות :

d [cm]	Y[R] [#]	Y[L] [#]	Δy [cm]	$100 \cdot \tan(\alpha_r)$	$100 \cdot \tan(\alpha_l)$
44		5	16	36.36363636	-11.36363636
44	141	8	15	34.09090909	-9.090909091
44	139	10	14	31.81818182	-6.818181818
44	136	15	13	29.54545455	-4.545454545
44	130	22	12	27.27272727	-2.272727273
44	127	26	11	25	0
44	121	32	10	22.72727273	2.272727273
44	116	36	9	20.45454545	4.545454545
44	112	40	8	18.18181818	6.818181818
44	107	46	7	15.90909091	9.090909091
44	102	51	6	13.63636364	11.36363636
44	98	55	5	11.36363636	13.63636364
44	94	60	4	9.090909091	15.90909091
44	88	65	3	6.818181818	18.18181818
44	82	70	2	4.545454545	20.45454545
44	79	73	1	2.272727273	22.72727273
44	83	79	0	0	25
44	66	86	-1	-2.272727273	27.27272727
44	61	90	-2	-4.545454545	29.54545455
44	57	93	-3	-6.818181818	31.81818182
44	53	98	-4	-9.090909091	34.09090909
44	48	103	-5	-11.36363636	36.36363636
44	43	107	-6	-13.63636364	38.63636364
44	39	110	-7	-15.90909091	40.90909091
44	33	116	-8	-18.18181818	43.18181818
44	30	118	-9	-20.45454545	45.45454545
44	23	124	-10	-22.72727273	47.72727273
44	19	128	-11	-25	50
44	14	132	-12	-27.27272727	52.27272727
44	10	134	-13	-29.54545455	54.54545455
44	6	136	-14	-31.81818182	56.81818182
44	3	138	-15	-34.09090909	59.09090909
44	2	139	-16	-36.36363636	61.36363636
44		141	-17	-38.63636364	63.63636364

אלו המדידות עבור $d=44\text{cm}$. העמודות השנייה והשלישית מציינות את הערכים האמיתיים שהתקבלו (מתורגמים ממספר הקסדצימלי למספר עשרוני). העמודה הרביעית מציינת את המרחק האמיתי (בציר ה X) מהנר. העמודות החמישית והשישית מציינות את 100 פעמים טנגנס הזווית של כל מצלמה. כאשר העמודה החמישית היא בעצם $100 \left[\frac{(\Delta y)}{d} \right]$ והעמודה השישית היא $100 \left[\frac{(\Delta y - 11)}{d} \right]$.

מכיוון שמיקומו את הנר מול המצלמה הימנית ולכן לחישוב הזווית עבור המצלמה השמאלית צריך להוריד 11 ס"מ (שווה בעצם ה b – המרחק האמיתי בס"מ בין המצלמות).

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



מדירות דומות עבור מרחק של 54 ס"מ:

d [cm]	Y[R] [#]	Y[L] [#]	Δy [cm]	$100 \cdot \tan(\alpha_r)$	$100 \cdot \tan(\alpha_l)$
54		3	21	38.88888889	-18.51851852
54	140	4	20	37.03703704	-16.66666667
54	139	6	19	35.18518519	-14.81481481
54	136	9	18	33.33333333	-12.96296296
54	133	10	17	31.48148148	-11.11111111
54	129	13	16	29.62962963	-9.259259259
54	125	17	15	27.77777778	-7.407407407
54	122	20	14	25.92592593	-5.555555556
54	118	24	13	24.07407407	-3.703703704
54	113	28	12	22.22222222	-1.851851852
54	110	31	11	20.37037037	0
54	106	36	10	18.51851852	1.851851852
54	101	40	9	16.66666667	3.703703704
54	99	44	8	14.81481481	5.555555556
54	95	47	7	12.96296296	7.407407407
54	91	51	6	11.11111111	9.259259259
54	87	55	5	9.259259259	11.11111111
54	84	59	4	7.407407407	12.96296296
54	80	64	3	5.555555556	14.81481481
54	76	67	2	3.703703704	16.66666667
54	73	69	1	1.851851852	18.51851852
54	66	76	0	0	20.37037037
54	62	80	-1	-1.851851852	22.22222222
54	58	84	-2	-3.703703704	24.07407407
54	55	87	-3	-5.555555556	25.92592593
54	51	91	-4	-7.407407407	27.77777778
54	47	95	-5	-9.259259259	29.62962963
54	43	98	-6	-11.11111111	31.48148148
54	40	101	-7	-12.96296296	33.33333333
54	35	105	-8	-14.81481481	35.18518519
54	31	108	-9	-16.66666667	37.03703704
54	27	112	-10	-18.51851852	38.88888889
54	24	115	-11	-20.37037037	40.74074074
54	19	119	-12	-22.22222222	42.59259259
54	15	122	-13	-24.07407407	44.44444444
54	10	127	-14	-25.92592593	46.2962963
54	7	131	-15	-27.77777778	48.14814815
54	4	134	-16	-29.62962963	50
54	3	135	-17	-31.48148148	51.85185185
54		137	-18	-33.33333333	53.7037037
54		139	-19	-35.18518519	55.55555556
54		140	-20	-37.03703704	57.40740741

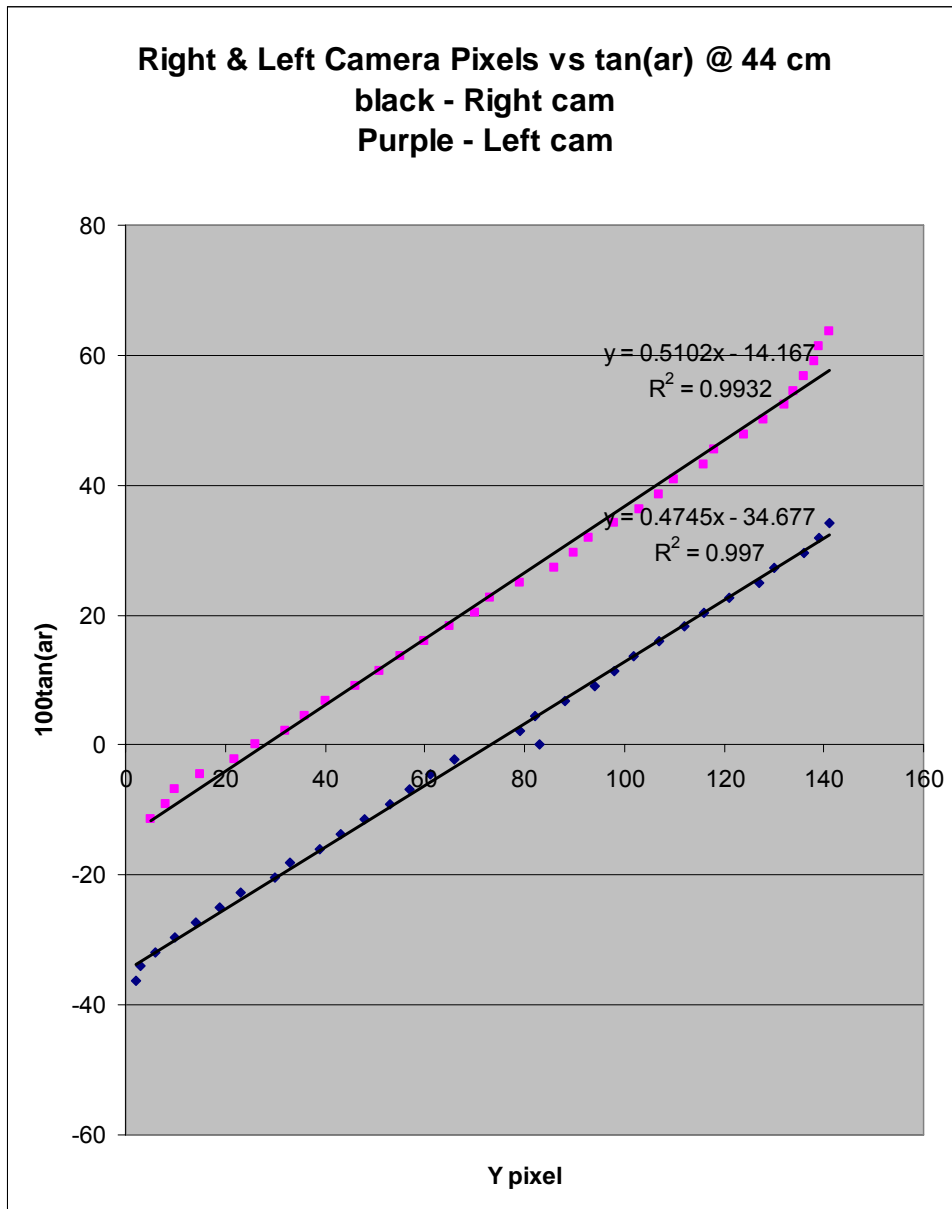
ואלו המדירות עבור מרחק של 54 ס"מ.

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**



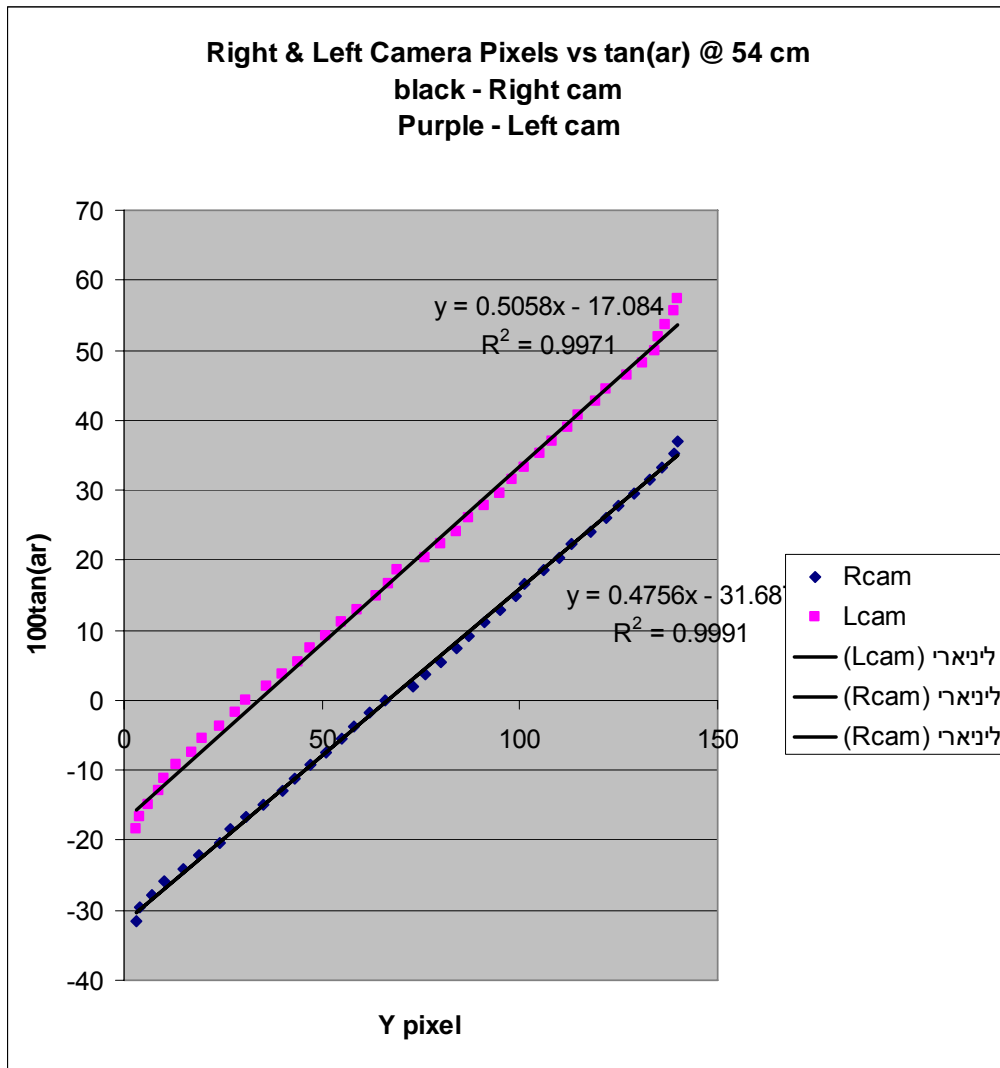
הגרפים שקיבלנו עבור כל מרחק:



הגרף עבור מרחק של 44 ס"מ.
הגרף העליון – עבור המצלמה השמאלית.
הגרף התחתון – עבור המצלמה הימנית.

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



זהו הגרף עבור מרחק של 54 ס"מ.
 גרף עליון - עבור מצלמה שמאלית.
 תחתון - עבור מצלמה ימנית.

ניתן לראות שעבור שני המרחקים, קיבלנו גרפים כמעט זהים. בנוסף, הגרפים, בתחומים של זוויות $|\theta| \leq 18^\circ$ התקבלו בקירוב ליניאריים, מה שיקל על דיוק במעבר בחישוב הזוויות. כמו כן ניתן לראות שבזוויות גדולות מידי, נגרם עיוות בתמונה, בשל הקמטת השטח האפקטיבי של הגוף, ומרכז המסה הנראית שלו, נמצאת על גבול הראיה של המצלמה.

על מנת לקבל וורייקציה נוספת לדיוק, מדרדנו את זווית המפתח של כל מצלמה, עבור כל אחת מהמדידות. זוויות המפתח שהתקבלו עבור כל מצלמה היא 40° , בדיוק של עד פחות מחצי מעלה. היא חושבה ע"י סכום של הזוויות המכסימליות שהמצלמה רואה בכל צד.

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



הוצאות המדידות

בעזרת מדידות אלו הפקנו את הגרפים ותוך כדי לינאריזציה, קיבלנו משוואות הממירות בין מספר פיקסל ל- $100\tan()$ (של הזווית המתאימה). משוואות אלו הפקנו באקסל lookup tables, אותן הכנסנו לתוכנה ותפקיד טבלאות אלו הוא המרת כל פיקסל המתקבל (לאורך הציר האופקי) לערך של הפונקציה המנורמלת של 100 פעמים $\tan()$ הזווית המדודה. ההחלטה היתה להפיק look up tables ולא חישוב חוזר ונשנה בזמן אמת, בגלל שהחישובים הללו נעשים בפסיקות זמן אמת ועל כן עליהן להיות כמה שיותר מהירות על מנת ולא להפריע לזמן העיבוד של התוכנה הראשית.

טבלאות ה- LookUp נראות כך:

```
-----  
;Conversion from Right Camera pixels to  
;round(100*tan(a)) = the angle that is seen by the camera.  
;normalized to fit no floating point numbers  
FthetaR:  
dc.b      -31  
dc.b      -31  
dc.b      -30  
dc.b      -30  
dc.b      -29  
dc.b      -29  
dc.b      -28  
dc.b      -28  
dc.b      -27  
dc.b      -27  
dc.b      -26  
dc.b      -26  
dc.b      -26  
dc.b      -25  
dc.b      -25  
dc.b      -24  
dc.b      -24  
dc.b      -23  
dc.b      -23  
dc.b      -22  
dc.b      -22  
dc.b      -21  
dc.b      -21  
dc.b      -20  
dc.b      -20  
dc.b      -19  
dc.b      -19  
dc.b      -18  
dc.b      -18  
dc.b      -17  
dc.b      -17  
dc.b      -16  
dc.b      -16
```

הגישה לטבלה היא על ידי לקיחת כתובת המוצא - FthetaR וה- offset נקבע על ידי מספר הפיקסל. כל שורה מגדירה בייט יחיד (dc.b=define constant byte) לדוגמא, באם מרכז האובייקט בציר האופקי התקבל בפיקסל מספר 2, ערך הפונקציה המנורמלת- $100\tan()$, יהיה -30.

כמו כן נראה כי הרזולוציה משתנה בקירוב עבור כל 2 פיקסלים, אך זה עבור מצלמה יחידה, ועבור 2 המצלמות, יש 2 טבלאות ונוצר מצב בו עבור 2 פיקסלים שונים במצלמה אחת, שעבורם $100\tan()$ מקבל ערך זהה מהטבלאות, של המצלמה השנייה אינו בעל ערך זהה ועל כן מתקבלת חד-חד ערכיות מקסימאלית (בשל הקירובים, עדיין קיימות נקודות שאינן חד-חד ערכיות, אך הן כה קרובות במרחב, שניתן להתייחס אליהן כאל אותה נקודה).

בצורה זו ניתן להפוך את הפיקסל הנתון לפונקציה של הזווית בדרך האלגנטית, היעילה והמהירה ביותר. זמן החישוב הוא מינימאלי ודורש הוצאת ערך מ- lookup table.

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