

به نام خدا

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تهران

گزارش پروژه درس رباتیک پیشرفته

(بخش اول)

تهیه کنندگان:

حمیدرضا قهرمانی ۸۱۰۱۹۳۲۴۷

سجاد گودرزی ۸۱۰۱۹۳۲۶۳

استاد درس :

جناب آقای دکتر مرادی

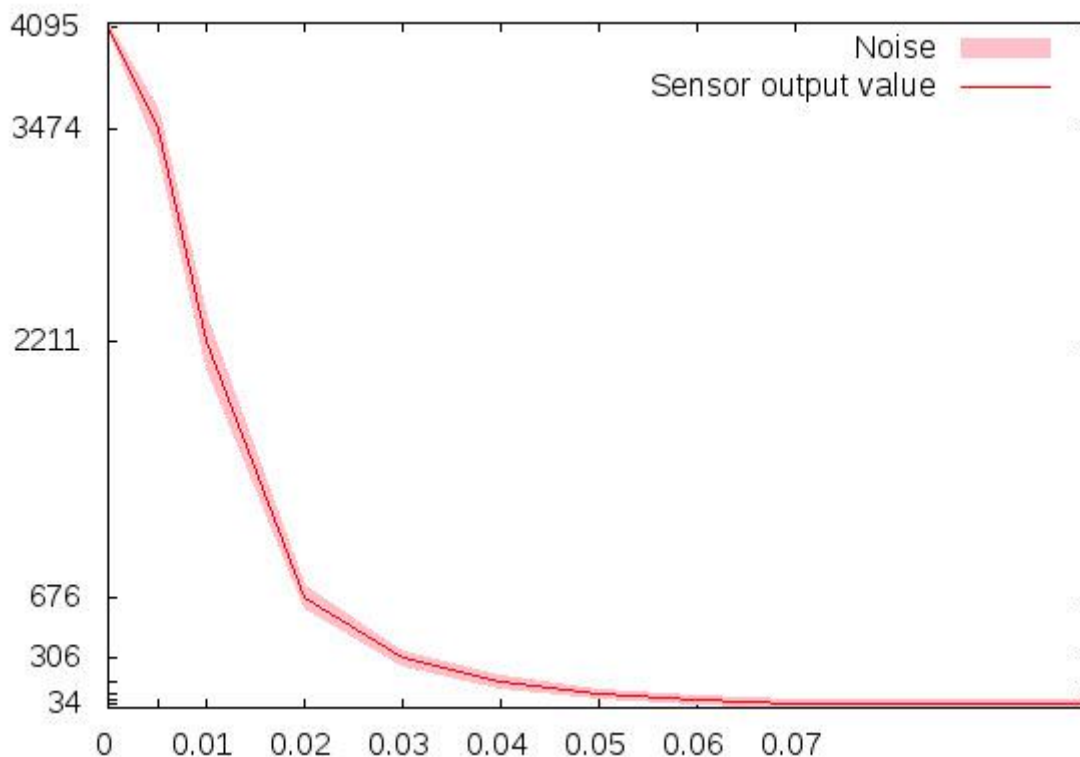
خرداد ۱۳۹۴

در این گزارش، توضیحاتی راجع به آزمایشات انجام گرفته برای فاز اول پروژه به منظور محاسبه مدل سنسور و مدل حرکتی ربات e-puck ارائه می دهیم. همچنین نتایج به دست آمده از این آزمایشات را نیز بیان می کنیم.

برای کنترل یک موبایل ربات نیاز به مدل سنسور و مدل حرکتی ربات می باشد. داده هایی که از سنسورهای یک ربات به دست می آیند به دلیل اینکه عدم قطعیت در آن ها وجود دارد، مقادیر ثابتی نیستند و دارای یک توزیع احتمالاتی هستند که توزیع آن ها اکثرا از نوع گوسی می باشد و دارای میانگین و واریانس مشخصی هستند که برای به دست آوردن آنها باید داده های یک سنسور را برای شرایط یکسان چند مرتبه محاسبه و ذخیره کرد و در نهایت مقادیر میانگین و واریانس آن را به دست آورد. در مورد مدل حرکتی نیز فرایندی شبیه مدل سنسوری اتفاق می افتد. به این معنی که به دلیل عدم قطعیت هایی که در حرکت ربات وجود دارد، ربات نمی تواند دقیقا فرمانی که ما به آن داده ایم را اجرا کند و در اجرای آن خطا وجود دارد. در واقع حرکت ربات نیز دارای یک توزیع گوسی است که باید با تکرار آزمایش، میانگین و واریانس آن را محاسبه کنیم. در ادامه مدل سنسوری و حرکتی ربات را به دست می آوریم.

مدل سنسوری

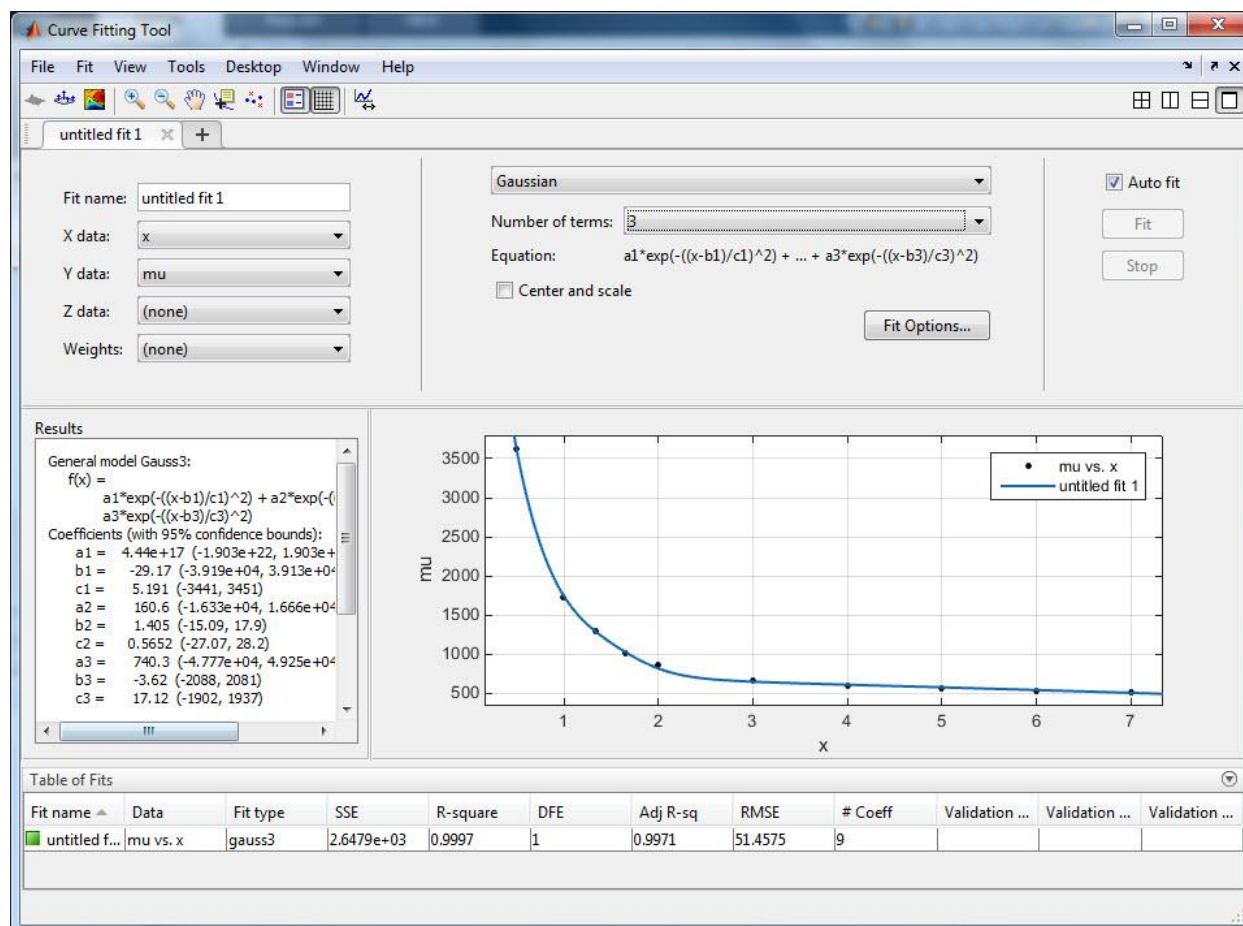
ربات e-puck دارای ۸ عدد سنسور IR می باشد که دورتادور ربات قرار گرفته اند و با توجه به فاصله ربات از موانع مقادیری بین ۰ تا ۴۰۰۰ را بر می گردانند. هرچه ربات به مانع نزدیکتر باشد مقدار عددی که سنسور برمی گرداند، بزرگتر است. نمودار زیر مطلب گفته شده را بیان می کند.



برای به دست آوردن مدل هر کدام از سنسورها فرایند زیر را برای تک تک آنها انجام دادیم:

۱. در برنامه webot سرعت حرکت چرخ ها را برای هر دو چرخ صفر کردیم.
۲. ربات را در راستای هر کدام از سنسورها، در فواصل معینی از یک مانع قرار دادیم به گونه ای که زاویه تابش IR عمود بر مانع باشد.
۳. مرحله دوم را برای فواصل ۰.۵ و ۱ و ۱.۳ و ۱.۶ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ سانتی متری از مانع انجام دادیم (به دلیل اینکه مقدار عددی که سنسور بر می گرداند دارای ماهیت غیرخطی می باشد، برای فواصل نزدیک، گام ها را کوچک تر انتخاب کرده ایم).
۴. برای هر فاصله، آزمایش را ۱۲۰ مرتبه تکرار کردیم. یا به عبارتی ۱۲۰ مرتبه مقدار سنسور را در شرایط یکسان به دست آوردیم. سپس تابع گوسی ان را محاسبه و میانگین و واریانس ان را نیز به دست آوردیم.

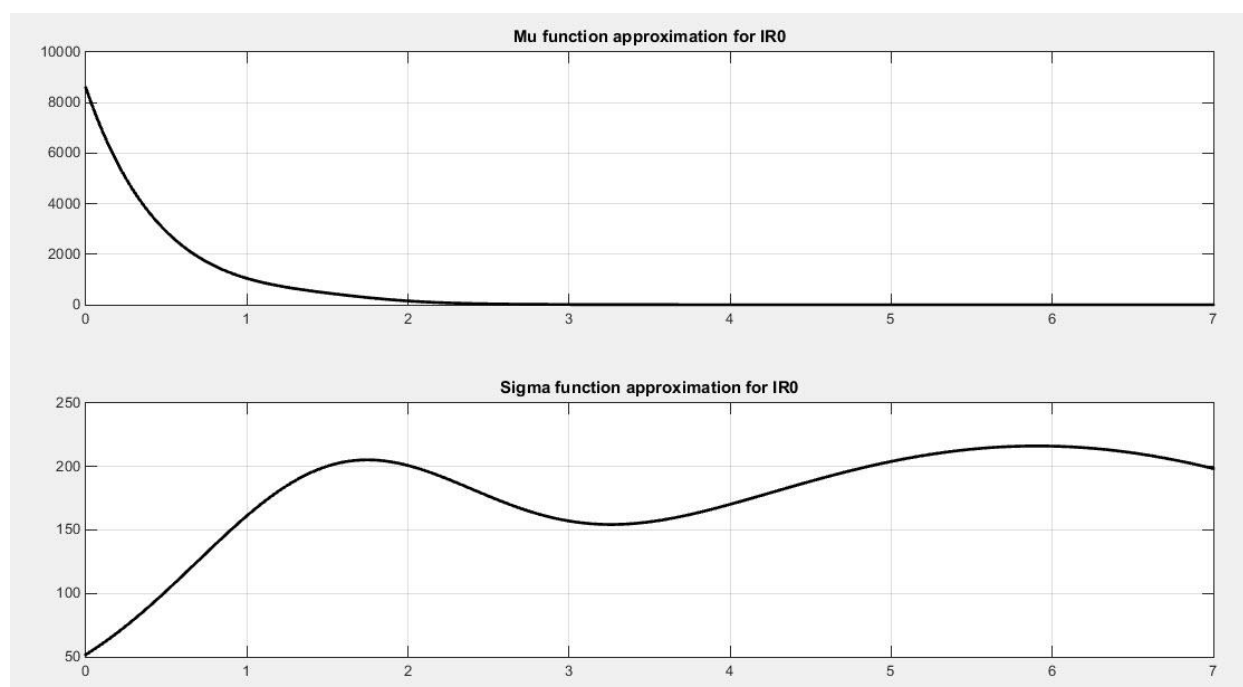
۵. با استفاده از جعبه ابزار **cftool** در نرم افزار متلب، تابعی خیرخطی از جنس گوسی برای هر کدام از نتایج تخمین زده و ضرایب آن را به دست آوردیم (در شکل زیر محیط جبهه ابزار **cftool** را مشاهده می کنید).



در ضمیمه گزارش ارسال شده، کد مربوط به تخمین تابعی برای هر سنسور در فایل هایی با نام **IR0,...,IR7** قرار داده شده است که ما نتایج آن ها را در زیر به تفکیک هر سنسور قرار داده ایم.

مدل سنسور IR0

برای محاسبه مدل سنسور IR0 ابتدا میانگین و واریانس هر ۱۲۰ داده را حساب کرده و به cftool می دهیم. تابع غیرخطی از خانواده توابع گوسی انتخاب شده است. تخمین تابعی را برای توابع گوسی با یک ترم، دو ترم و سه ترم گوسی انجام می دهیم. سپس با توجه به مقدار SSE (مجموع مربعات خطا) و با توجه به شکل به دست آمده برای تابع، بهترین مدل را انتخاب کرده و ضرایب آن را یادداشت می کنیم. به این ترتیب مدل سنسور به دست می آید. شکل زیر نمودار میانگین مقادیر خوانده شده در فواصل مختلف و نمودار واریانس آنها را نشان می دهد.



تابع به دست آمده برای میانگین به صورت زیر است:

$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 4.44e+17; \quad b1 = -29.17; \quad c1 = 5.191;$$

$$a2 = 160.6; \quad b2 = 1.405; \quad c2 = 0.5652;$$

$$a3 = 740.3; \quad b3 = -3.62; \quad c3 = 17.12;$$

همچنین تابع به دست آمده برای واریانس به صورت زیر است:

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2 - b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2 - b2}{c2}\right)^2}$$

$$a1 = 146.4; \quad b1 = 1.536; \quad c1 = 1.27;$$

$$a2 = 216.2; \quad b2 = 5.904; \quad c2 = 3.74;$$

همانند سنسور IR0 برای مابقی سنسورها نیز به همین ترتیب مدل ان ها را به دست می آوریم.

مدل سنسور IR1

$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2}$$

$$a1 = 2988; \quad b1 = 0.242; \quad c1 = 0.8989;$$

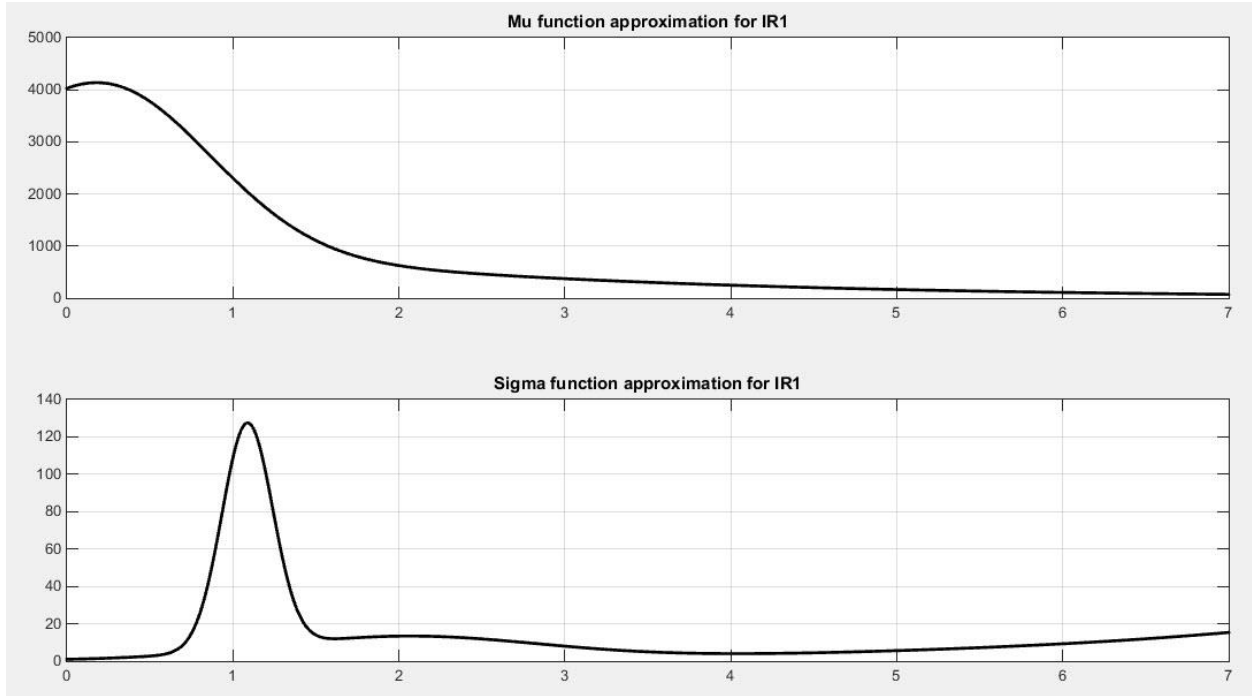
$$a2 = 4.337 \times 10^{17}; \quad b2 = -167.8; \quad c2 = 29;$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 120.6; \quad b1 = 1.087; \quad c1 = 0.2164;$$

$$a2 = 12.19; \quad b2 = 2.031; \quad c2 = 1.15;$$

$$a3 = 5.272 \times 10^{15}; \quad b3 = 140.7; \quad c3 = 23.11;$$



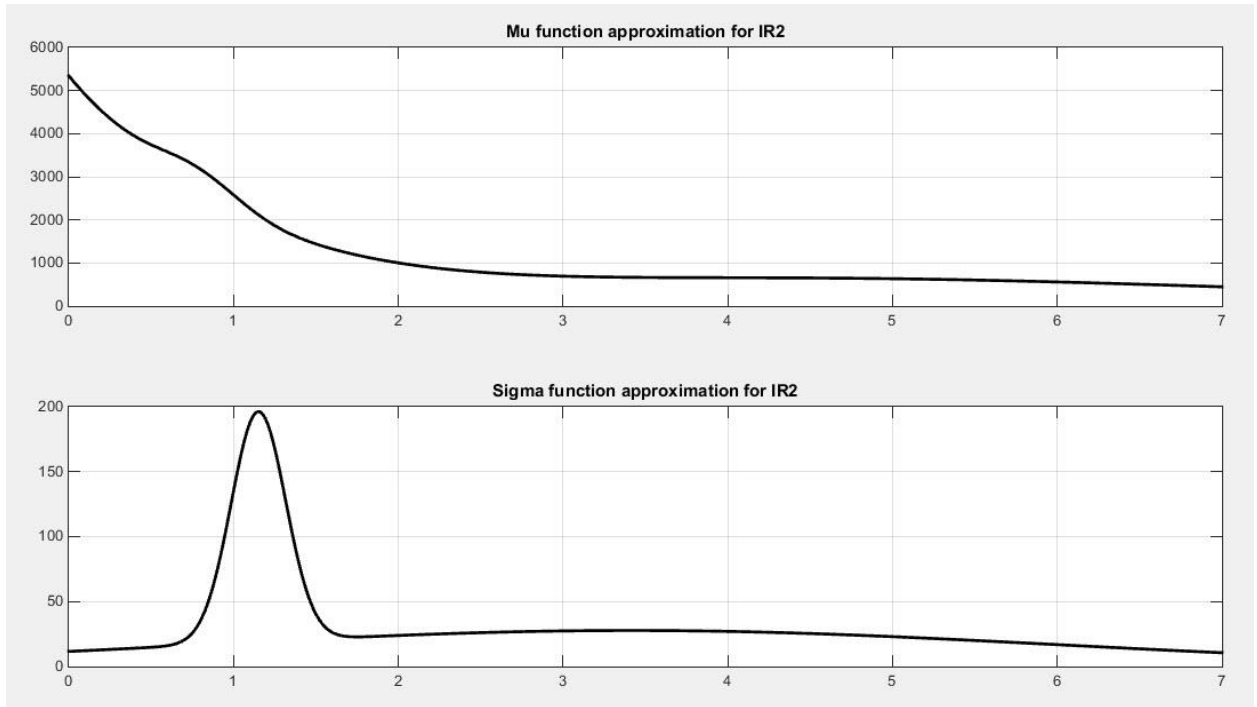
مدل سنسور IR2

$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} a1 &= 4.608 \times 10^{17}; & b1 &= -138; & c1 &= 24.81; \\ a2 &= 564.2; & b2 &= 0.7781; & c2 &= 0.3708; \\ a3 &= -1.66 \times 10^4; & b3 &= -2.881; & c3 &= 4.772; \end{aligned}$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} a1 &= 177.4; & b1 &= 1.151; & c1 &= 0.2344; \\ a2 &= 27.74; & b2 &= 3.414; & c2 &= 3.659; \end{aligned}$$



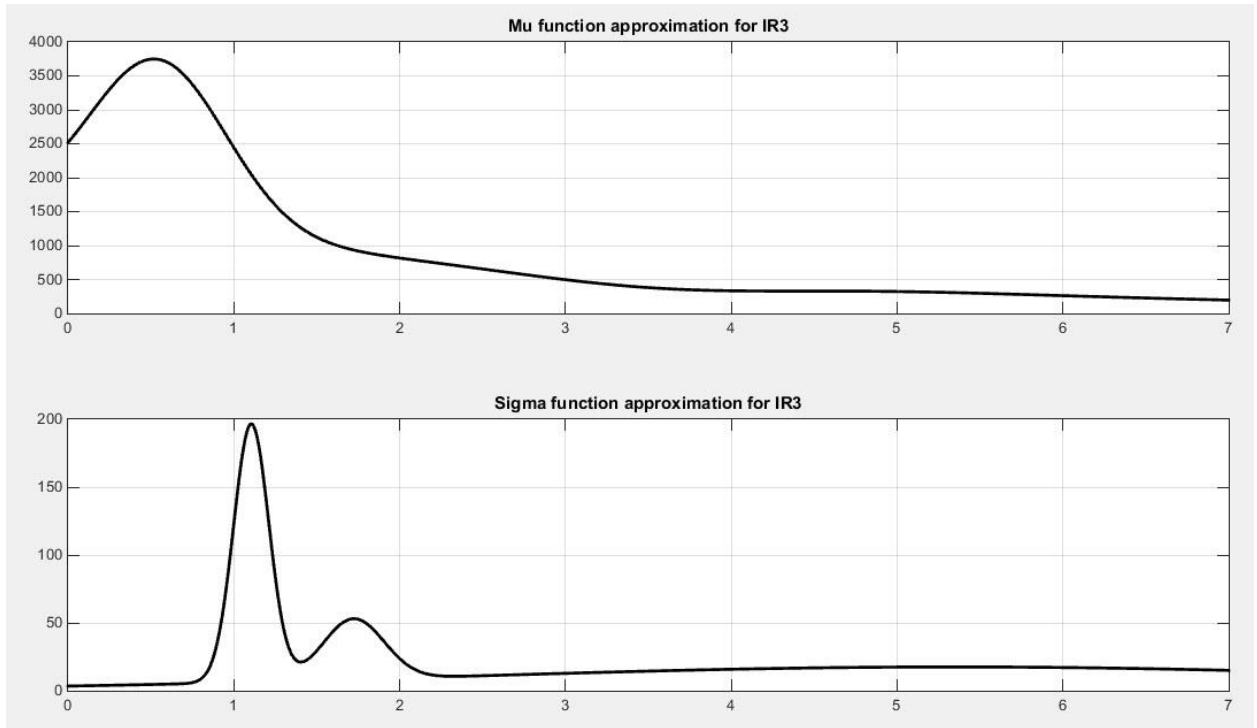
مدل سنسور IR3

$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} a1 &= 5.477 \times 10^{17}; & b1 &= -235.6; & c1 &= 40.68; \\ a2 &= 2473; & b2 &= 0.5422; & c2 &= 0.5808; \\ a3 &= -163.4; & b3 &= 3.528; & c3 &= 1.124; \end{aligned}$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} a1 &= 190.2; & b1 &= 1.105; & c1 &= 0.1507; \\ a2 &= 44.81; & b2 &= 1.722; & c2 &= 0.2611; \\ a3 &= 17.53; & b3 &= 5.346; & c3 &= 4.188; \end{aligned}$$



$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 1704; \quad b1 = -1.975; \quad c1 = 2.962;$$

$$a2 = 2919; \quad b2 = 0.05792; \quad c2 = 0.862;$$

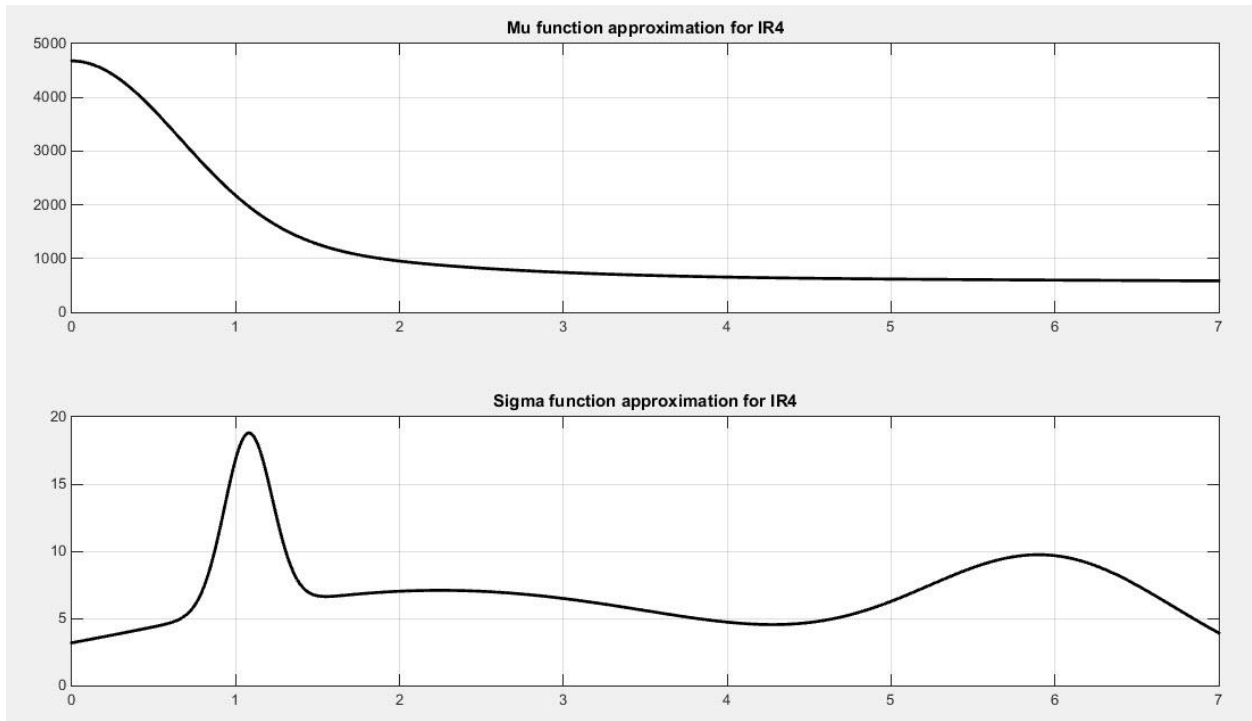
$$a3 = 1547; \quad b3 = -76.91; \quad c3 = 84.98;$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 13.1; \quad b1 = 1.078; \quad c1 = 0.2051;$$

$$a2 = 8.922; \quad b2 = 5.967; \quad c2 = 1.104;$$

$$a3 = 7.084; \quad b3 = 2.246; \quad c3 = 2.509;$$



$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 4.677 \times 10^{17}; \quad b1 = -153; \quad c1 = 27.33;$$

$$a2 = -871.3; \quad b2 = 1.113; \quad c2 = 1.111;$$

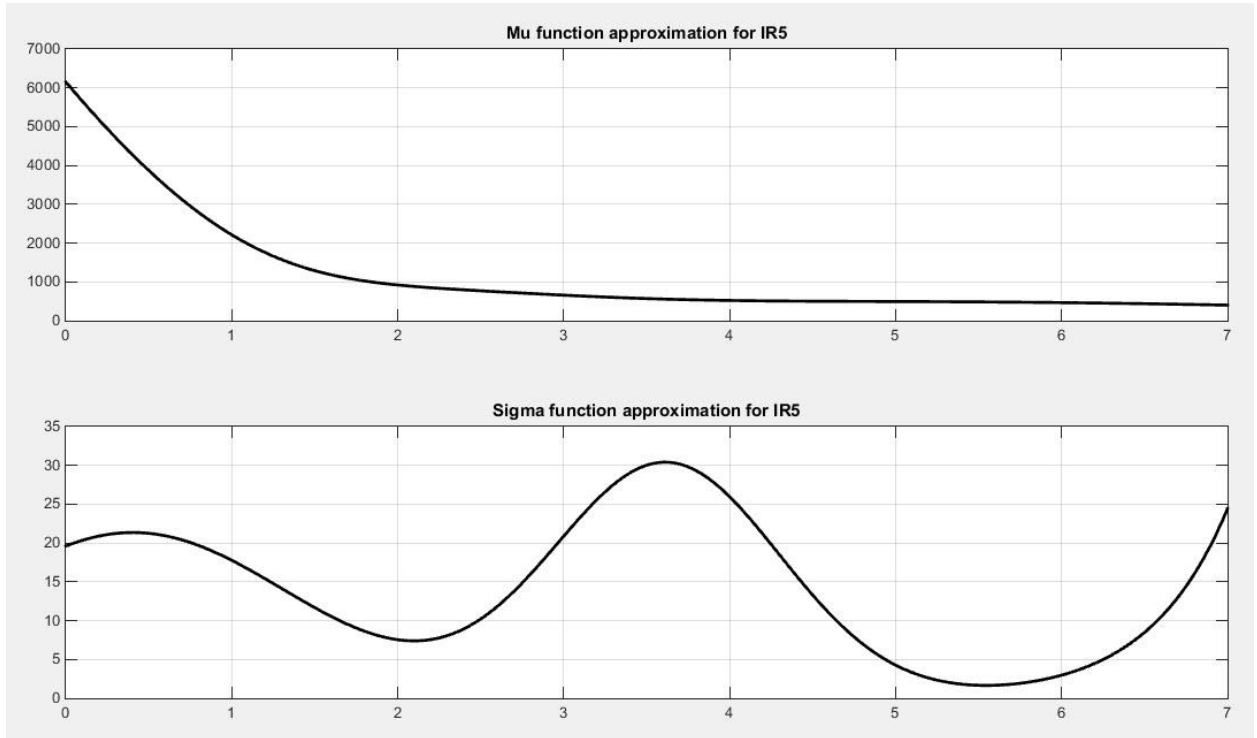
$$a3 = -5015; \quad b3 = -0.3246; \quad c3 = 4.108;$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 30.3; \quad b1 = 3.616; \quad c1 = 0.9695;$$

$$a2 = 7.202 \times 10^{15}; \quad b2 = 38.77; \quad c2 = 5.504;$$

$$a3 = 21.35; \quad b3 = 0.4042; \quad c3 = 1.385;$$



$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 2739; \quad b1 = 0.638; \quad c1 = 0.6323;$$

$$a2 = 0; \quad b2 = -5.799; \quad c2 = 0.6643;$$

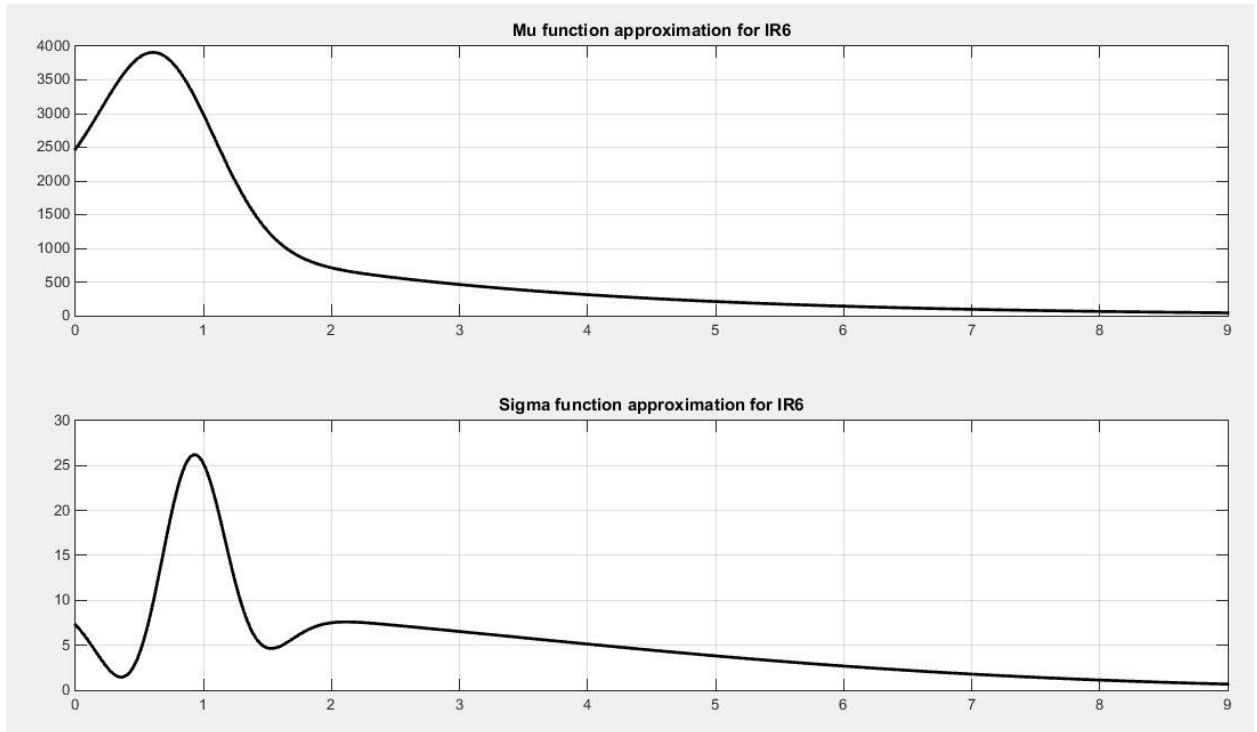
$$a3 = 4.452 \times 10^{17}; \quad b3 = -172.8; \quad c3 = 29.93;$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 302; \quad b1 = 0.8934; \quad c1 = 0.4466;$$

$$a2 = -285.2; \quad b2 = 0.8869; \quad c2 = 0.4686;$$

$$a3 = 9.893; \quad b3 = -0.8852; \quad c3 = 6.031;$$



$$F(\mu) = a1 \times e^{-\left(\frac{\mu-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\mu-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\mu-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 165.6; \quad b1 = 2.237; \quad c1 = 0.7756;$$

$$a2 = 5168; \quad b2 = -0.3407; \quad c2 = 1.219;$$

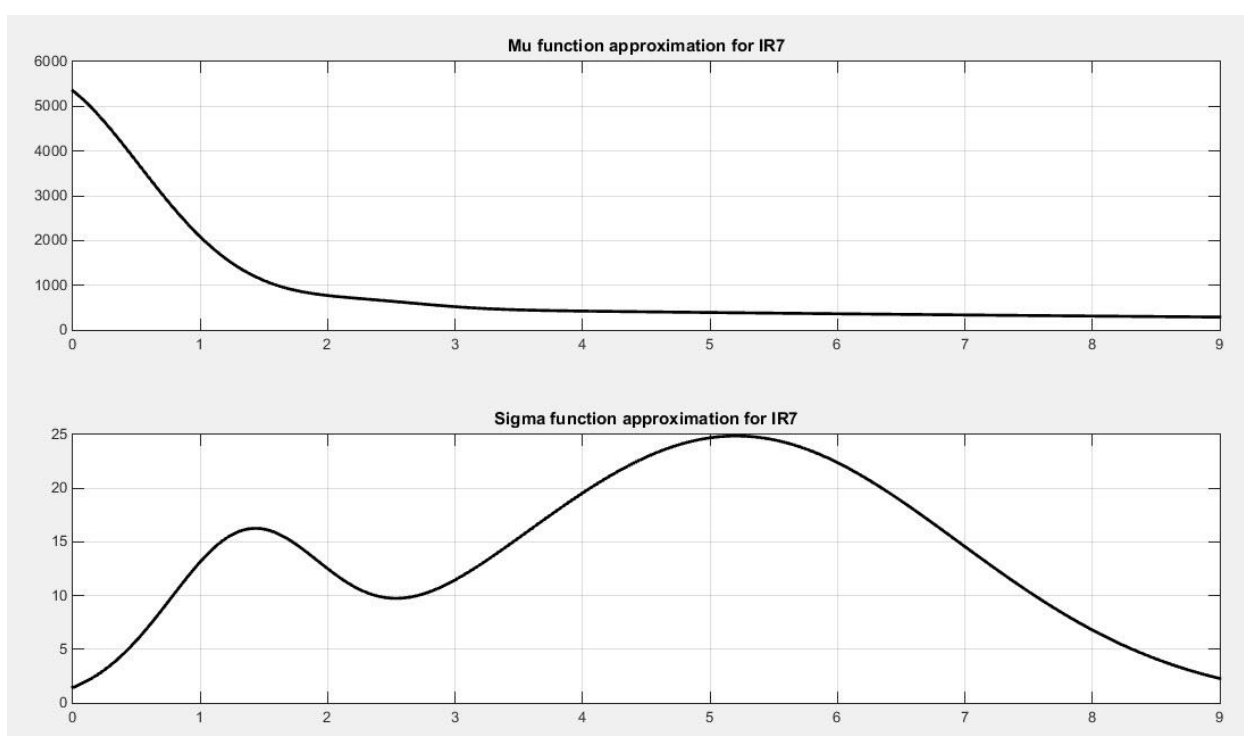
$$a3 = 3.235 \times 10^{17}; \quad b3 = -901.1; \quad c3 = 154.6;$$

$$F(\sigma^2) = a1 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b1}{c1}\right)^2} + a2 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b2}{c2}\right)^2} + a3 \times e^{-\left(\frac{\sigma^2-b3}{c3}\right)^2}$$

$$a1 = 0; \quad b1 = -8.064; \quad c1 = 1.207;$$

$$a2 = 24.87; \quad b2 = 5.204; \quad c2 = 2.455;$$

$$a3 = 14.03; \quad b3 = 1.355; \quad c3 = 0.8581;$$



در بخش بعد به محاسبه مدل حرکتی ربات می پردازیم.

مدل حرکتی ربات

در یک موبایل ربات ۴ نوع خطای حرکتی وجود دارد. یعنی وقتی چرخش های ربات می چرخند و ربات شروع به حرکت می کند، تا زمانی که به مقصد برسد، ۴ نوع مختلف از خطا می تواند در حرکتش ایجاد شود که عبارتند از:

- خطای چرخش در واحد چرخش
- خطای چرخش در واحد جا به جایی
- خطای جا به جایی در واحد چرخش
- خطای جا به جایی در واحد جا به جایی

این خطاها به علت وجود عدم قطعیت در حرکت ربات ایجاد می شوند. مثلاً از زمانی که ما به موتورهای فرمان ایست می دهیم تا لحظه ای که متوقف می شوند مدت زمان متغیری طول می کشد. برای محاسبه این خطاها باید ربات را در آزمایشات مختلف به حرکت در آوریم و توزیع گوسی هر خطا را با محاسبه میانگین و واریانس آزمایشات تکراری در آن مورد محاسبه کنیم. در نهایت با استفاده از سودو کد زیر مدل حرکتی ربات به دست می آید:

1: **Algorithm sample_motion_model_velocity(u_t, x_{t-1}):**

2: $\hat{v} = v + \text{sample}(\alpha_1|v| + \alpha_2|\omega|)$

3: $\hat{\omega} = \omega + \text{sample}(\alpha_3|v| + \alpha_4|\omega|)$

4: $\hat{\gamma} = \text{sample}(\alpha_5|v| + \alpha_6|\omega|)$

5: $x' = x - \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \sin \theta + \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \sin(\theta + \hat{\omega}\Delta t)$

6: $y' = y + \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cos \theta - \frac{\hat{v}}{\hat{\omega}} \cos(\theta + \hat{\omega}\Delta t)$

7: $\theta' = \theta + \hat{\omega}\Delta t + \hat{\gamma}\Delta t$

8: **return** $x_t = (x', y', \theta')^T$

در سودوکد بالا مقادیر $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ همان خطاهای اشاره شده هستند که عبارتند از:

α_1 : خطای جا به جایی در واحد جا به جایی / واحد: سانتی متر بر سانتی متر

α_2 : خطای جا به جایی در واحد چرخش / واحد: سانتی متر بر رادیان

α_3 : خطای چرخش در واحد جا به جایی / واحد: رادیان بر سانتی متر

α_4 : خطای چرخش در واحد چرخش / واحد: رادیان بر رادیان

برای محاسبه مقادیر فوق به ترتیب زیر عمل می کنیم (کلیه مقادیر اندازه گرفته شده در دو فایل اکسل به نام های rotation error و translation error قرار داده شده اند) :

محاسبه α_1 :

ربات را ۱۰ بار به اندازه ۱۰ سانتی متر حرکت می دهیم. سپس مقدار دقیق جا به جا شده را با استفاده از کاغذ میلیمتری اندازه گرفته و یادداشت می کنیم. سپس مقدار خطا بین مقادیر اندازه گرفته شده و مقدار واقعی را محاسبه می کنیم و بر عدد ۱۰ تقسیم می کنیم تا مقدار خطا در واحد طول به دست آید. همین کار را برای مقدار ۲۰ سانتی متر نیز انجام می دهیم. سپس مقادیر فوق را روی هم ریخته و میانگین و واریانس آنها را محاسبه می کنیم. در یک فایل متلب با نام alpha1 کد مربوطه نوشته شده است. نتایج حاصل از اجرای کد برابرند با:

$$\mu_{\alpha_1} = 0.045, \quad \sigma_{\alpha_1}^2 = 8.8092 \times 10^{-4}$$

محاسبه α_2 :

برای محاسبه این خطا به این صورت عمل می کنیم که ربات را در جای خودش بدون این که حرکت کند، ۱۰ مرتبه به اندازه ۳۶۰ درجه می چرخانیم و سپس مقداری که مرکز ربات نسبت به شروع چرخش خود جا به جا شده است را محاسبه می کنیم (برای این که ربات در جای خودش بچرخد باید سرعت یک چرخ را قرینه سرعت چرخ دیگر تعیین کنیم تا ربات نسبت به مرکز خود بچرخد). مقدار این جا به جایی را بر عدد 2π تقسیم می کنیم تا مقدار خطای جا به جایی در واحد چرخش به دست آید. همین کار را برای زاویه 4π نیز تکرار می کنیم. سپس مقدار ۲۰ داده را روی هم ریخته و میانگین و واریانس آن را محاسبه می کنیم. نتایج این فرایند به صورت زیر است:

$$\mu_{\alpha_2} = 0.0088, \quad \sigma_{\alpha_2}^2 = 2.433 \times 10^{-5}$$

محاسبه α_3 :

برای محاسبه این خطا ربات را به مقدار ۱۰ سانتی متر و ۲۰ سانتی متر (هر کدام ۱۰ مرتبه) در یک مسیر مستقیم حرکت می دهیم. سپس زمانی که ربات به صورت کامل متوقف شد، مقدار انحراف ربات را از راستای حرکت نسبت به مرکز ربات محاسبه می کنیم. برای این کار از یک کاغذ میلیمتری استفاده می کنیم. مقدار خطایی که از این طریق به دست می آید را بر مقدار مسیر طی شده تقسیم می کنیم تا خطای چرخش در واحد جا به جایی به دست آید. نکته ای که وجود دارد این است که مقدار انحرافی که از روی کاغذ میلیمتری به دست می آید برابر طول قطاعی از دایره محیطی پیرامون ربات است که باید با تقسیم آن بر شعاع ربات، آن را به زاویه تبدیل کنیم. نتایج به دست را روی هم ریخته و میانگین و واریانس آن ها را محاسبه می کنیم. نتایج به دست آمده عبارتند از:

$$\mu_{\alpha_3} = 9.5862 \times 10^{-4}, \quad \sigma_{\alpha_3}^2 = 8.7794 \times 10^{-6}$$

محاسبه α_4 :

برای محاسبه خطای چرخش در واحد چرخش، ربات را حول مرکز خود به مقدار $+90, -45, +45$ درجه می چرخانیم. سپس با استفاده از یک گونیا مقدار دقیق زاویه چرخش را محاسبه کرده و با استفاده از آن خطای چرخش را به دست می آوریم. سپس با تقسیم کردن خطای به دست آمده بر مقدار اصلی چرخیده شده، خطای چرخش در واحد چرخش به دست می آید. لازم به ذکر است این آزمایش را برای هر کدام از درجات فوق 10 مرتبه تکرار می کنیم و در انتها کل داده ها را روی هم ریخته و میانگین و واریانس آن ها را محاسبه می کنیم. نتایج به دست آمده عبارتند از:

$$\mu_{\alpha_4} = 0.1181 \quad \sigma_{\alpha_4}^2 = 0.0056$$

به این ترتیب مدل حرکتی ربات epuck را محاسبه کردیم. از نتایج به دست آمده از این فاز پروژه در بخش بعدی که مربوط به مکان یابی ربات است استفاده می کنیم.