



رباتیک هوایی

استاد : دکتر امین طلائی زاده

پروژه شماره 2

تاریخ: 1403/05/16

اعضای گروه:

عرفان رادفر

شماره دانشجویی: 99109603

محمدجواد شمس الدین سعید

شماره دانشجویی: 99106266

اسما حلاجی

شماره دانشجویی: 99109585

تابستان 1403

2	طراحی
2	موتور
4	پره
4	باتری
5	ESC
5	برد کنترلر پرواز
6	سنسور IMU
7	سنسور GPS
7	بدنه پرنده frame
7	تخمین قیمت و وزن
8	مدلسازی
12	شبیه سازی و کنترل
14	Altitude Control
16	Position Control
18	ناوبری
22	هدایت
25	مسیریابی
29	منابع

- از بین سناریو های پروازی زیر یکی را انتخاب و برای آن اجزا پرنده خود را انتخاب کنید.
- ۱- پهپاد کشاورزی با ماکسیم وزن پیلود ۳۰ کیلو گرم (این وزن در طول پرواز به صورت خطی کم می شود) و مداومت پروازی ۱۵ دقیقه
 - ۲- پهپاد جابه جایی مرسوله پستی با وزن پیلود ۵ کیلو گرم (این وزن در نصف مداومت پروازی پرنده روی آن قرار دارد) و مداومت پروازی ۲۰ دقیقه
 - ۳- پهپاد آشنشنان با وزن پیلود ۱۵ کیلو گرم و مداومت پروازی ۱۰ دقیقه
 - ۴- پهپاد FPV مسابقه ای با وزن پیلود ۰.۵ کیلو گرم و مداومت پروازی ۱۰ دقیقه ، سرعت بیشینه ۱۰ متر بر ثانیه
 - ۵- پهپاد نقشه برداری با وزن پیلود ۲ کیلو گرم و مداومت پروازی ۲۰ دقیقه
 - ۶- مینی پهپاد با وزن کلی ۳۰۰ گرم و مداومت پروازی ۸ دقیقه
- در این بخش با گزارش دیتاشیت اجزا انتخابی و شرح مراحل و معادلات حاکم بر طراحی، اجزای مورد نظر را برای پرنده در سناریو انتخاب شده طراحی کنید. (ظرایب طراحی با فرض مهندسی منطقی، دلخواه می باشد)

جدول ۱: List of designed parts for multirotor

Part	Specification
Motor	Kv&Thrust&Voltage&Current&Power&Weight
Battery	Voltage&Decharge-rate&Storage&Weight
ESC	I_{MAX} &Weight
Frame	Wheelbase & C_D & Frame Weight
Propeller	Diameter&Pitch&Number-of-blades& C_T , C_M &Weight
Board Controller Flight	frequency
IMU sensor	σ of sensor noise
GPS sensor	σ of sensor noise

در آخر با جستجو در فروشگاه های آنلاین، برآوردی از هزینه ساخت پرنده را همراه با لینک سایت مرجع گزارش کنید.

پرنده انتخابی یک پرنده پستی با امکان حمل 5 کیلوگرم بار به مدت 10 دقیقه و مداومت پروازی کل 20 دقیقه است. در اینصورت با بررسی نمونه های مشابه مانند [1] MX860 T-motor و [2] GWD-800T می توان یک کوادروتور انتخاب کرد و وزن 10 کیلوگرم برای پرنده بدون بار تخمین زد، در نتیجه ماکسیمم وزن take off را نیز 15 کیلوگرم در نظر می گیریم.

موتور

از طرفی چون تنها در نصف مسیر پرنده باید بار را حمل کند، برای انتخاب روتور و تامین نیروی تراست فرض می کنیم که در حالت throttle 65٪، پرنده بتواند وزن خود و محموله آن را تحمل کند در نتیجه هر روتور باید بتواند 3.75 کیلوگرم تراست تولید کند. در عین حال پرنده باید بتواند شتاب حداقل 8 m/s^2 را نیز حین تیکآف ایجاد کند. در نتیجه ماکسیمم تراست در حالت 95٪ باید از رابطه زیر محاسبه شود (100٪ را انتخاب نمی کنیم چون کنترل پرنده در حالت اشباع ممکن نیست.)

$$\frac{10 + 8}{10} \cdot 3.75 \text{ kg} = 6.75 \text{ kg}$$

در نتیجه موتور MN605S انتخاب می‌شود که با ضریب اطمینان به طور میانگین 5٪، خواسته پرنده را برآورده می‌کند. قیمت بسته دوتایی این موتور \$280 است که برای 4 موتور برابر با \$560 می‌شود. همچنین وزن هر موتور 350 گرم است پس وزن کل برابر با 1.4 کیلوگرم می‌شود.[3]

MN605-S

Specifications

Features

Parameter

BUY NOW

Motor Size	Φ68.8*39.9mm		
Stator	Imported silicon steel sheet; Anti-rust treatment; 180°C high temperature-resisting coatings		
Configuration	24N28P		
Shaft Diameter	IN : 6mm , OUT : 6mm		
Bearing	Imported 626ZZ		
Magnet Level	150°C high temperature resistance		
Lead Cable	14AWG*150mm		
Copper Wire	180°C high temperature resistance: Level H		
Coil Insulation Test	500V		
Centrifugal Cooling Design	YES		
Rotor Dynamic Balance Standard	≤5Mg		
Motor Dynamic Balance Standard	≤10Mg		
IP	IP45		

KV	170	Rated Voltage(Lipo)	6-12S
Idle Current (20V)	1.0A	ESC Recommendation	FLAME 60A 12S
Peak Current (180s)	35A	Propeller Recommendation	20-22"
Max. Power (180s)	1700W	Motor Weight (Incl. Cable)	350g
Internal Resistance	65mΩ	Package Weight	980g(2PCS/SET)

KV	320	Rated Voltage(Lipo)	6S
Idle Current (17V)	2.2A	ESC Recommendation	FLAME 70A 6S
Peak Current (180s)	55A	Propeller Recommendation	20-22"
Max. Power (180s)	1400W	Motor Weight (Incl. Cable)	350g
Internal Resistance	21mΩ	Package Weight	960g(2PCS/SET)

Type	Propeller	Throttle	Voltage (V)	Thrust (g)	Torque (N*m)	Current (A)	RPM	Power (W)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature (°C)
MN605S KV320	T-MOTOR P22*6.6	40%	23.84	1502	0.34	6.70	2832	139	10.13	64 (Ambient Temperature: 34.5°C)
		42%	23.83	1696	0.37	7.70	2988	155	9.88	
		44%	23.80	1772	0.40	8.30	3084	172	9.67	
		46%	23.77	1913	0.44	9.00	3197	192	9.41	
		48%	23.75	2092	0.47	10.00	3311	213	9.17	
		50%	23.71	2294	0.51	11.40	3462	236	8.96	
		52%	23.68	2483	0.55	12.50	3586	264	8.65	
		54%	23.64	2658	0.59	14.00	3704	292	8.43	
		56%	23.60	2797	0.62	14.70	3801	321	8.25	
		58%	23.56	2989	0.67	16.30	3926	350	7.96	
		60%	23.52	3140	0.72	17.40	4031	378	7.70	
		62%	23.48	3277	0.77	18.70	4137	407	7.64	
		64%	23.44	3509	0.81	20.20	4265	439	7.36	
		66%	23.40	3620	0.85	21.70	4346	476	7.25	
		68%	23.35	3875	0.91	23.30	4465	508	7.17	
		70%	23.30	4054	0.95	25.20	4584	544	7.00	
		75%	23.17	4584	1.06	30.00	4859	636	6.69	
		80%	23.05	5038	1.17	35.10	5105	726	6.38	
		90%	22.75	6108	1.42	45.30	5591	939	5.90	
		100%	22.46	7178	1.67	58.60	6008	1136	5.52	

برای انتخاب پره، با توجه به جدول موتور، پره P22*6.6 را انتخاب می‌کنیم. [4] همچنین از جدول موتور، در 50% throttle می‌توان C_m و C_T را تخمین زد. (در اینجا چگالی هوا 1 کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است)

$$C_T = \frac{2 * T_{50\%}}{\omega^2} = 3.42 * 10^{-4} N.s^2/rad^2$$

$$C_M = \frac{2 * M_{50\%}}{\omega^2} = 7.76 * 10^{-6} N.m.s^2/rad^2$$

Specifications			
Model NO.	22*6.6(558.8mm*167.6mm)	T-MOTOR Series	2blades-integrated
Weight (Single Blade)	45±2g	Material	CF+Epoxy
Thrust Limitation	11.5kg	Ambient Temp	-40°C ~ 65°C
Optimum RPM	2800-4800 RPM/min	Storage Temp/Humidity	-10°C ~ 50°C / <85%
Surface Treatment	Polished		

با توجه به قیمت 140 دلاری برای هر جفت آن، هزینه کل برابر با 280 دلار و وزن هر چهار پره برابر با 180 گرم می‌شود.

باتری

این پرنده باید بتواند 10 دقیقه با 50% throttle و 10 دقیقه با throttle تقریباً 44% (تا تراست بدون بار تامین شود). با فرض اینکه پرنده قابلیت مانورپذیری بالایی داشته باشد و بتواند شتاب مناسبی بگیرد، برای 20 دقیقه مدت پرواز، گاز میانگین را 70% می‌گیریم. به این نحو می‌توان مطمئن بود که باتری کمتر از 20% ظرفیت خود در هر مرحله تخلیه نمی‌شود. با توجه به جدول موتور یعنی 25.20 آمپر در ولتاژ 23.30 ولت. برای هر 4 موتور در مدت 20 دقیقه، از رابطه زیر ظرفیت مورد نیاز را به دست می‌آوریم.

Light Weight, Small Size, High Energy Density

Ultra High Voltage 4.45v/cell

35000mAh

20c

7s

Battery ZYE POWER

High Safety

Motio New

4.08kg

237Wh/kg

205x138x73mm

27.65v (31.15v)

$$25.20A * 20min * \frac{1hour}{60min} * 4rotor = 33600 mAh$$

در ولتاژ 23.30 ولت یعنی حداقل به 7 سلول باتری نیاز داریم تا بتوانیم چنین ولتاژی را تامین کنیم. در نهایت باتری Zye Power 7s را انتخاب می‌کنیم [5]. مشخصات این باتری در جدول زیر نمایش داده شده است. وزن باتری برابر 4.08 کیلوگرم و قیمت آن 539 دلار است. از طرفی در 100% throttle برای هر موتورها، جریان 58.6 و در مجموع 235 آمپر تخلیه نیاز خواهیم داشت. با توجه به این باتری ظرفیت تخلیه مداوم 12C یعنی 420 آمپر را دارد، مشکلی برای گاز 100% نداریم.

ESC

برای کنترل سرعت موتور، از 4 کنترلر **HobbyKing Red Brick (2~7S) 70A ESC V2** استفاده می‌کنیم که می‌توانند جریان 70A را نیز که فراتر از 56 آمپر مورد نیاز پرنده است را تامین کند [6]. قیمت چهار عدد از این اسپید کنترلر برابر با 96 دلار و وزن آنها برابر با 280 گرم می‌شود.

Specs:
 Constant Current: 70A
 Max Burst Current: 90A
 Input Voltage: 2~7S (7.4~25.9), 6~20 NiCd/NiMH
 BEC: 5V/5 A
 Dimensions: 60x35x18mm
 Weight: 70g
 Servo Lead: JR Type

برد کنترلر پرواز

با توجه به آنکه به یک برد با فرکانس بالا برای آپدیت وضعیت پرنده نیاز داریم، **SpeedyBee F405 Mini BLS 35A 20x20 Stack** را انتخاب می‌کنیم [7]. این برد، توانایی کنترل 4 موتور و جهت آنها را دارد. در عین حال امکان اتصال از راه دور نیز برای آن فراهم است. با توجه به آنکه برنامه پرنده برای پست محصول از قبل مشخص است نیاز به فرستنده از راه دور نیست در عین حال می‌توان ماژول‌های مخابراتی دیگر را



با استفاده از بردهای کنترلی پیشرفته تر مانند RaspberryPi و Arduino به پرنده متصل کرد. همچنین از ESC پیشنهاد شده در قسمت قبل برای کنترل استفاده می‌کنیم. قیمت این برد به تنهایی 31 دلار و وزن آن حدود 10 گرم است.

سنسور IMU

برای سنسور حرکتی از MPU-6000 استفاده می‌کنیم که دارای نویز پایین و دقت بالا با فرکانس 420KHz یا 1MHz می‌باشد و دارای سنسور 3 محوره برای Gyroscope و Accelerometer است. قیمت این سنسور حدودا 10 دلار است و مشخصات آن در تصویر زیر آمده است [8].

6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY Full-Scale Range ADC Word Length Sensitivity Scale Factor Initial Calibration Tolerance Sensitivity Change vs. Temperature Nonlinearity Cross-Axis Sensitivity	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
	Output in two's complement format		16		bits	
	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
			±3		%	
ZERO-G OUTPUT Initial Calibration Tolerance ¹ Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes		±50		mg	
	Z axis		±80		mg	
	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35			
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE			0.5		g	
NOISE PERFORMANCE Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		µg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION						

6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
GYROSCOPE SENSITIVITY Full-Scale Range Gyroscope ADC Word Length Sensitivity Scale Factor Sensitivity Scale Factor Tolerance Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature Nonlinearity Cross-Axis Sensitivity	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
	FS_SEL=0		16		bits	
	FS_SEL=1		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		32.8		LSB/(°/s)	
	25°C	-3	16.4	+3	LSB/(°/s)	
			±2		%	
GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO) Initial ZRO Tolerance ZRO Variation Over Temperature Power-Supply Sensitivity (1-10Hz) Power-Supply Sensitivity (10-250Hz) Power-Supply Sensitivity (250Hz-100kHz) Linear Acceleration Sensitivity	25°C		±20		°/s	
	-40°C to +85°C		±20		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
	Static		0.1		°/s/g	
GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE Total RMS Noise Low-frequency RMS noise Rate Noise Spectral Density	FS_SEL=0 DLPFCFG=2 (100Hz) Bandwidth 1Hz to 10Hz At 10Hz		0.05 0.033 0.005		°/s-rms °/s-rms °/s/√Hz	
GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES X-Axis Y-Axis Z-Axis		30 27 24	33 30 27	36 33 30	kHz kHz kHz	
LOW PASS FILTER RESPONSE	Programmable Range	5		256	Hz	
OUTPUT DATA RATE	Programmable	4		8,000	Hz	
GYROSCOPE START-UP TIME ZRO Settling	DLPFCFG=0 to ±1% of Final		30		ms	

برای سنسور GPS از سنسوری با قابلیت اطمینان بالا استفاده می‌کنیم به همین جهت HGLRC M100-5883 GPS انتخاب می‌شود. قیمت این سنسور 18 دلار بوده و وزن نزدیک به 7 گرم دارد. خطای این سنسور (rms) برابر با 2 متر است [9].

- Chip: M10
- Systems: GPS, Glonass, BDS, Galileo, SBAS, QZSS
- Baudrate: 115200
- Protocol: UBLOX
- Frequency: 10Hz
- Compass: QMC5883
- Input Voltage: 3.3-5V
- Size: 21x21x8mm
- Weight: 7.7g
- Sensitivity: -160dBm
- Horizontal Accuracy: 2D approx. 2m
- Betaflight: 4.3 or newer

بدنه پرنده frame

ابتدا باید wheelbase محاسبه گردد. قطر پره برابر با 558 میلی متر است در نتیجه برای کوادکوپتر داریم:

$$1.1 * d * (1 + \sqrt{2}) = \phi_{wheelbase}$$

قطر بدنه حدود 148 سانتی متر است.

با فرض آنکه از بدنه فیبر کربن استفاده کنیم، بدنه ای مشابه RJX 1450mm 4-Axis برای ابعاد پرنده مناسب است [10]. قیمت بدنه آلومینیومی همین سازه تقریباً 300 دلار تخمین زده می‌شود. وزن آن نیز تقریباً 4.5 کیلوگرم است.

از طرفی با توجه به رابطه

$$C_D = C_{D1} * (1 - \sin^3 \theta) + C_{D2} * (1 - \cos^3 \theta)$$

در اینجا $C_{D1} = C_{D2} = 0.20$ تخمین زده می‌شود.

تخمین قیمت و وزن

با در نظر گرفتن قیمت تمام اجزا، به علاوه اتصالات (حدوداً 200 دلار) قیمت نهایی برابر با 2034 دلار می‌شود. همچنین وزن نهایی با در نظر گرفتن 300 گرم برای سیمها و اتصالات، برابر با 10.37 کیلوگرم می‌شود که به تخمین 10 کیلوگرمی اولیه ما نزدیک است.

در این بخش مدل دینامیکی پرنده انتخابی را متناسب با سناریو انتخاب شده و همراه با شبیه ساز سه بعدی Simscape که در فاز قبلی انجام شد را در یک فایل سیمولینک ذخیره کنید. همان طور که می دانید در مرحله مدلسازی از یک سری ترم ها در رفتار دینامیکی پرنده صرف نظر می شود مانند: مدل اجزای پرنده مانند موتور، باتری، اسپید کنترلر، تاخیر در بخش الکترونیک، باد و سایر اختلالات آیرودینامیکی وارده به پرنده مانند اثر زمین و اثر گردابه حاصل از چرخش ملخ ها و تاثیر جریان ملخ ها بر روی بدنه، ممان های ضربی، و غیره.

در این بخش باید مدل دینامیکی پرنده را با اضافه کردن بخش های زیر دقیق تر کنید.
-مدل موتور

موتور را با استفاده از یک تابع تبدیل به فرم زیر مدل کنید. (زمان نشست بین ۰.۰۵ تا ۰.۱ ثانیه) (این تابع تبدیل باید از نوع damping critically یا damping over باشد)

$$\frac{K_t}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a b)s + R_a b + K_e K_t}, \quad (1)$$

-مدل اسپید کنترلر

اسپید کنترلر را با استفاده از یک تابع تبدیل به فرم زیر مدل کنید. (زمان نشست بین ۰.۰۱ تا ۰.۰۵ ثانیه)

$$\frac{1}{Ts + 1}, \quad (2)$$

-مدل درگ

$$\vec{F}_{wind} = \frac{1}{2} \rho A C_D V_{UAV}^2 \quad (3)$$

-مدل باد

باد را به صورت یک نیروی اختشاشی ۳ ثانیه ای به صورت زیر مدل کنید.

$$\vec{F}_{wind} = \frac{1}{2} \rho A C_D \vec{v}_{rel}^2 \quad (4)$$

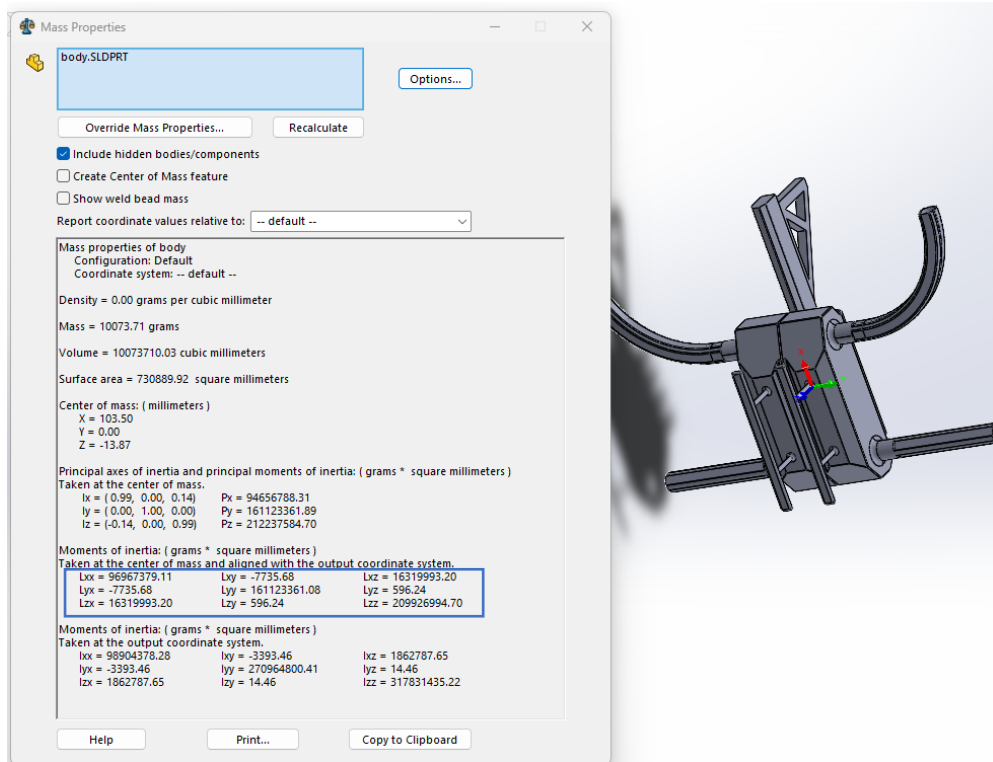
$$\vec{V}_{rel} = \vec{v}_{UAV} - \vec{v}_{wind}$$

-یکی از ممان های ضربی

حداقل یکی از ممان های ضربی پرنده (I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}) غیر صفر باشد. با خروجی گرفتن از Mass Properties از پرنده طراحی شده در نرم افزار Solidwork ممان های اینرسی را گرفته و حتما یکی از ممان های اینرسی ضربی را در نظر بگیرید.

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ویژگی دینامیکی پرنده طراحی شده در تصویر زیر قابل مشاهده است.



در نتیجه ممان اینرسی برابر با کادر آبی رنگ می‌شود. یا به عبارتی برابر با مقدار زیر است.

$$I = \begin{bmatrix} 0.09696 & -0.000007 & 0.0163 \\ -0.000007 & 0.161 & 0.0 \\ 0.0163 & 0.0 & 0.210 \end{bmatrix} Kg.m^2$$

همچنین برای مدل موتور با توجه به [3] از مقادیر زیر استفاده می‌کنیم.

$$K_e = 27, K_t = 0.0208, R_a = 20\Omega, b = 0.001, L_a = 0.000015, J = 0.003kg.m^2$$

در نهایت تابع تبدیل موتور برابر با مقدار زیر می‌شود.

$$G_{motor} = \frac{0.0208}{0.000000045s^2 + 0.006s + 0.5816}$$

همچنین تابع ESC و تابع تبدیل کنترلر در نهایت باید گین نهایی موتور را برابر با 1 کند در نتیجه

$$G_{ESC} = \frac{27.962}{0.002s + 1}$$

زمان نشست برای موتور 0.03 ثانیه و برای ESC برابر با 6 میلی ثانیه است.

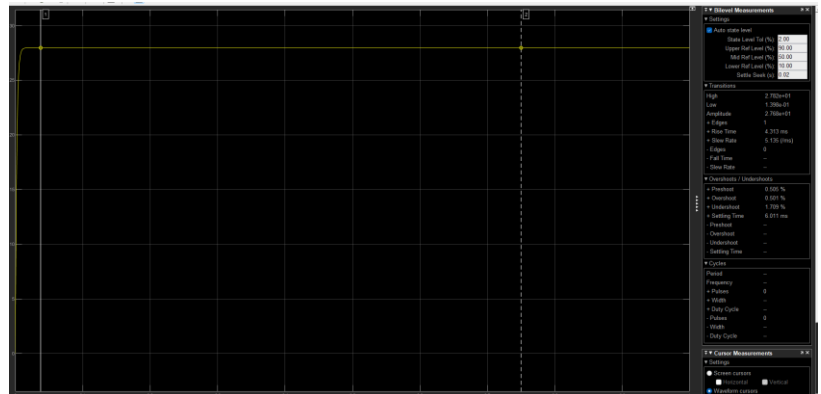
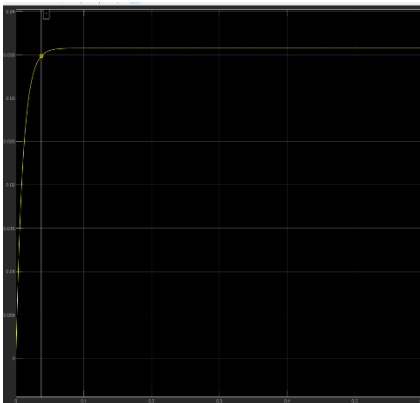
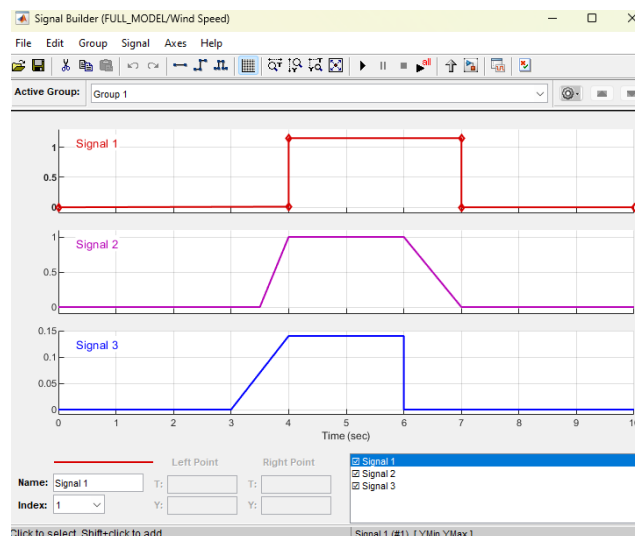


Figure 1: زمان نشست ESC (راست) و موتور (چپ)

برای مدل باد نیز از signal builder برای ساخت سیگنالی رندوم استفاده می‌کنیم که هر نمودار به ترتیب نسب سرعت باد در جهات محور مختصات است. همچنین در نهایت این سیگنال را در گین دلخواه (برای تعیین اندازه سرعت باد) ضرب می‌کنیم.



و از تابع زیر برای محاسبه نیروی باد استفاده می‌کنیم.

```
function Fw = fcn(V_wind,V)
    CD = 0.20 ;
    A_side = 1.6 * 0.6;
    Fw = 0.5*A_side*CD*(V_wind-V).*abs(V_wind-V);
```

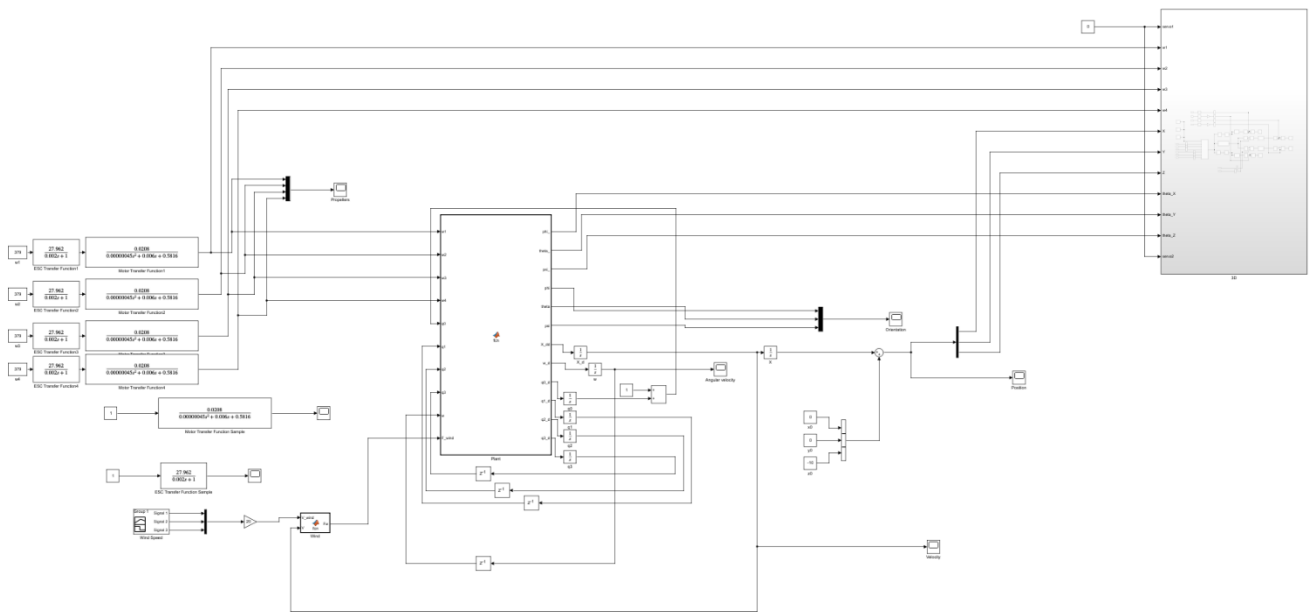
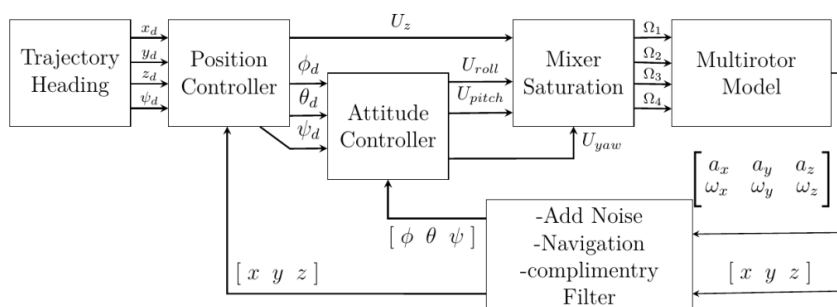


Figure2 :Full Model

مدل نهایی در تصویر 2 قابل مشاهده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام بخش شبیه سازی.

کنترل

در این بخش با اضافه کردن بلوک های کنترلر که در ادامه آورده شده بر روی مدل پرنده انتخابی، پرنده را در دو مود Hold altitude و Position Hold کنترل کنید. پیشنهاد می شود پس از انجام مود کنترلی altitude Hold به سراغ حلقه خارجی Position Hold بروید. با تنظیم ضرایب کنترلر ها سعی کنید به خواسته های زیر برسید

جدول ۲: Desired response for Multirotor flight controller

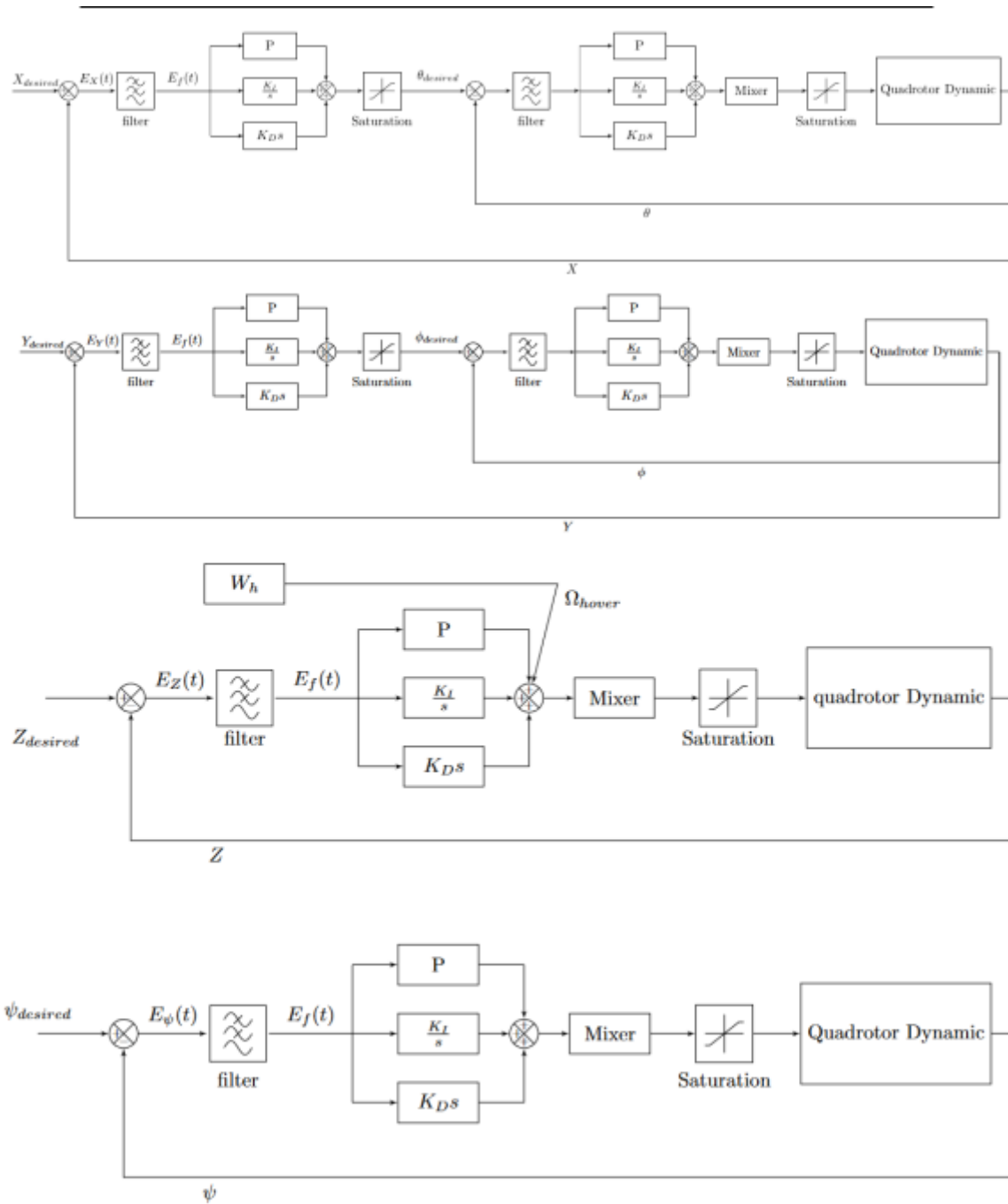
channel	settling time	overshoot
ϕ	۲s	۵%
θ	۲s	۵%
ψ	۲s	۵%
x	۲.۵ s	۷%
y	۲.۵ s	۷%
z	۲.۵ s	۷%

طراحی کنترلر
در طراحی ظرایب کنترلر ها باید به صورت مرحله ای عمل کرد و از کانال های به نسبت پایدار تر به کانال های ناپایدار و خارجی رفت. پیشنهاد میشود ابتدا کانال ارتفاع (Z)، سپس کانال (ψ) و سپس کانال های (ϕ) و (θ) و در نهایت کانال های (X) و (Y) را طراحی کنید.
روش های طراحی ظرایب بهینه کنترلر ها:
۱- سعی و خطا هوشمند
۲- خطی سازی مدل پرنده و طراحی کنترلر برای هر کانال به صورت جداگانه با استفاده از دستور زیر:

$$Linearized_model = \frac{A}{s^2} \quad (۶)$$

$$PID = pidtune(Linearized_model, 'PID');$$

۳- استفاده از PID Tunner بلوک PID Controller سیمولینک



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل مولتی روتور در ساختار تو در تو.

برای کنترل جهت و ارتفاع از رابطه زیر بهره می گیریم.

$$\begin{aligned} f_z &= -mg + PID(\hat{v}_z - v_z) \\ f_x &= PID(\hat{v}_x - v_x) \\ M_x &= PID(\hat{v}_y - v_y) \\ M_y &= PID(\hat{\theta} - \theta) \\ M_z &= PID(\hat{\psi} - \psi) \end{aligned}$$

برای تنظیم PID ابتدا تنها ضریب نسبت را تغییر می دهیم، سپس ضریب مشتق و در نهایت ضریب انتگرالگیر تا PID مورد قبول و با عملکرد متناسب ایجاد شود.

در اینجا بر روی خروجی کنترلر فیلتر اشباع می گذاریم تا دستوری بیش از توان عملگرها به میکسر ندهد. در عین حال برای خروجی میکسر نیز، اشباع می گذاریم. (با حد بالای ماکسیمم سرعت 6008 دور بر دقیقه یا 629 رادیان بر ثانیه و حد پایین صفر)

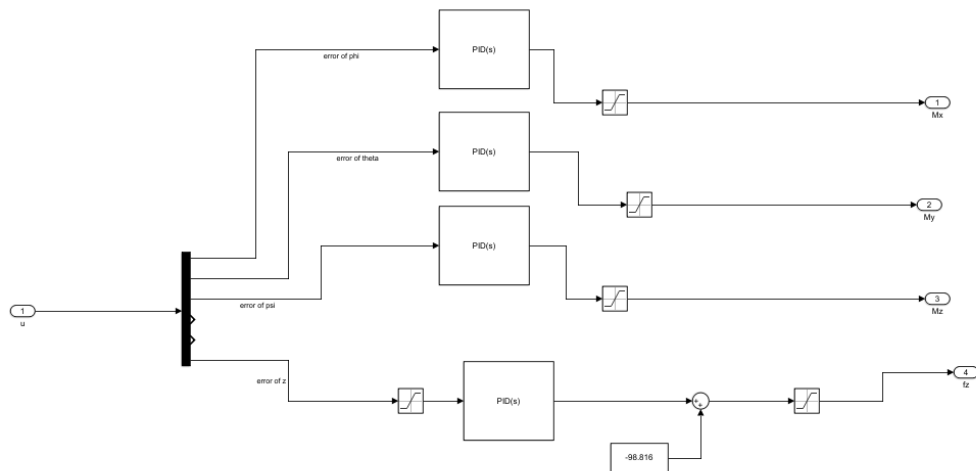
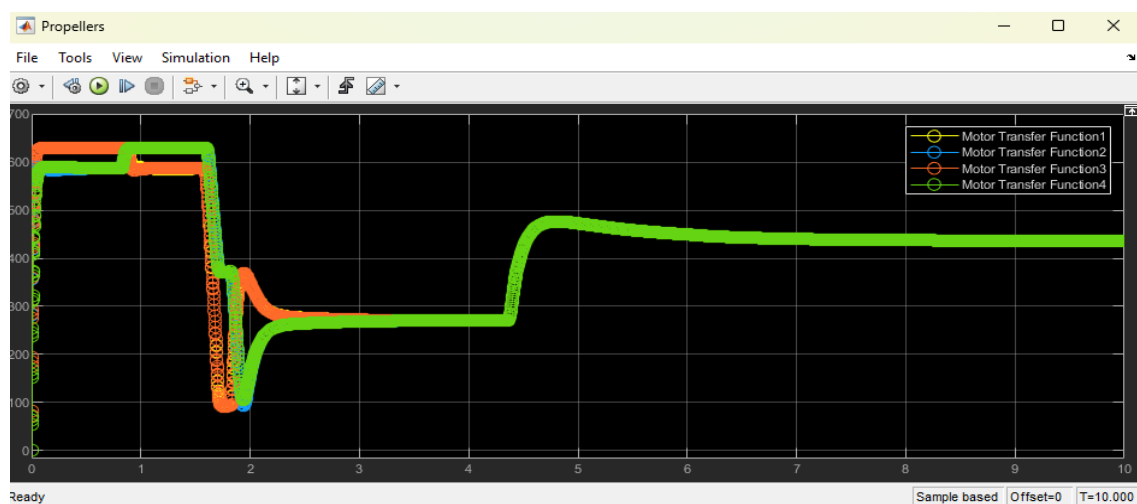
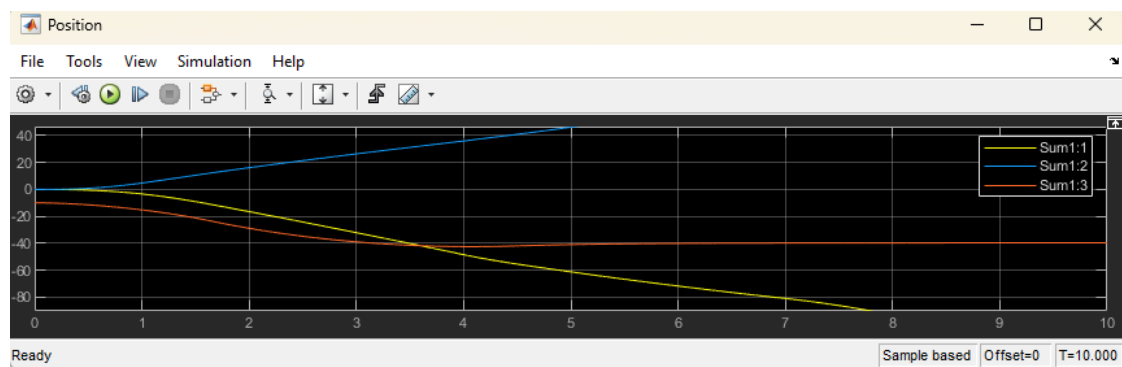
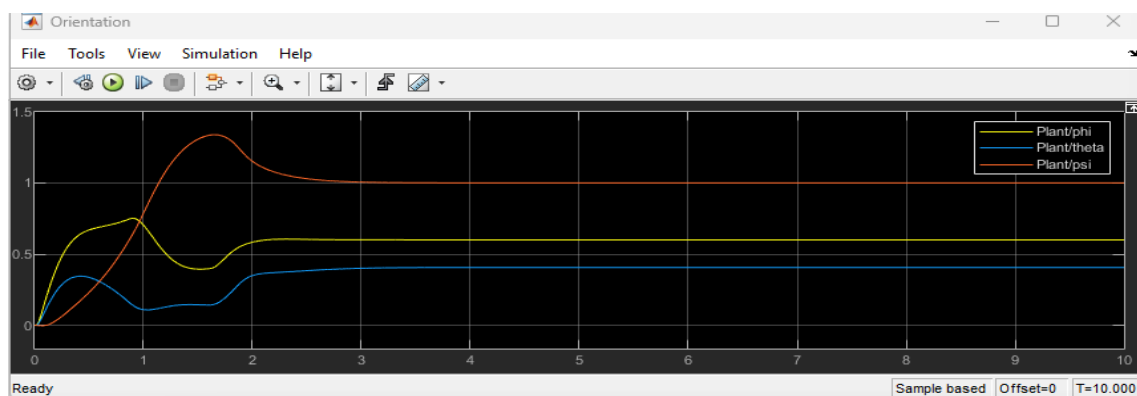


Figure 3: سیستم کنترل ارتفاع

با فرض وجود باد رفتار پرنده با این کنترلر به شکل زیر است. همانطور که مشاهده می‌شود، قید ماکسیمم سرعت موتورها، 629 رادیان بر ثانیه حفظ شده است. (زوایا بر اساس رادیان، موقعیت بر اساس متر و سرعت پره های به رادیان بر ثانیه است).



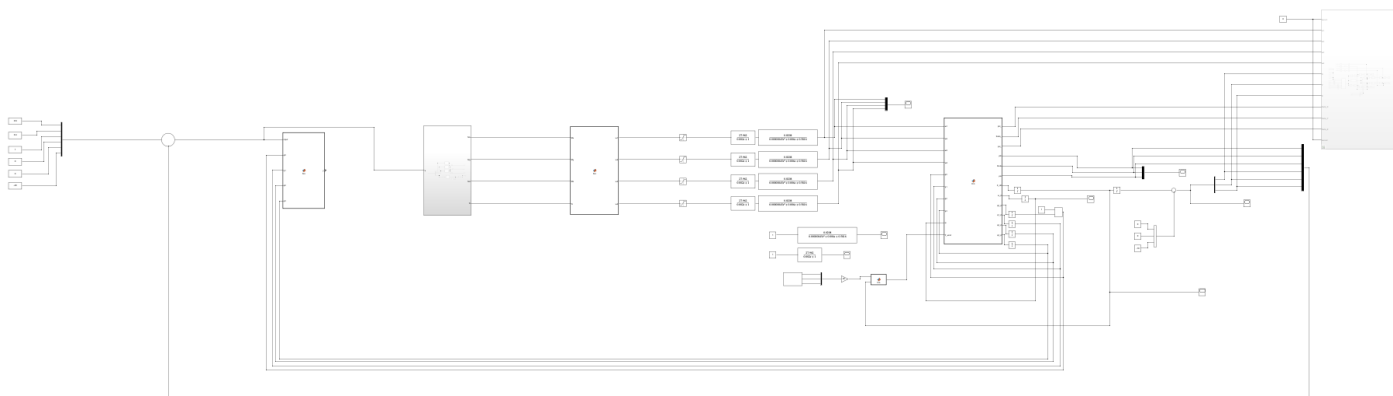


Figure 4: بلوک دیاگرام کنترل ارتفاع

Position Control

برای کنترل موقعیت، باید یک حلقه خارجی ایجاد کنیم تا با استفاده از آن زوایای دلخواه roll و pitch برای جابه جایی مورد نظر را تعیین کنیم. در این کنترلر ماکسیمم سطح تغییرات دو زاویه را 40 درجه برابر با 0.7 رادیان قرار می‌دهیم (از طریق فیلتر اشباع) شکل نهایی کنترلر خارجی به فرم زیر است.

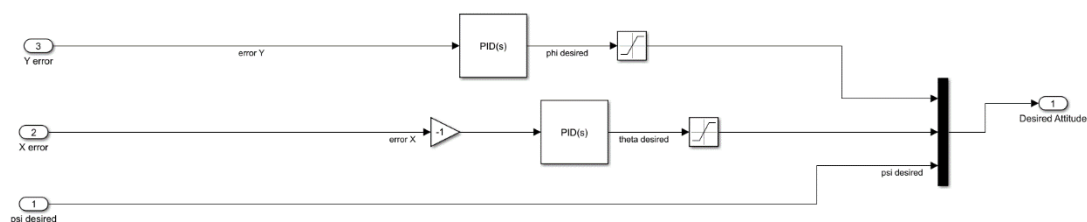


Figure 5: کنترلر خارجی موقعیت

در نهایت به کنترلر نقاط هدف و زاویه yaw دلخواه داده شده و پرنده به آن وضعیت می‌رود. بلوک دیاگرام کنترلر نهایی در شکل زیر نمایش داده شده است.

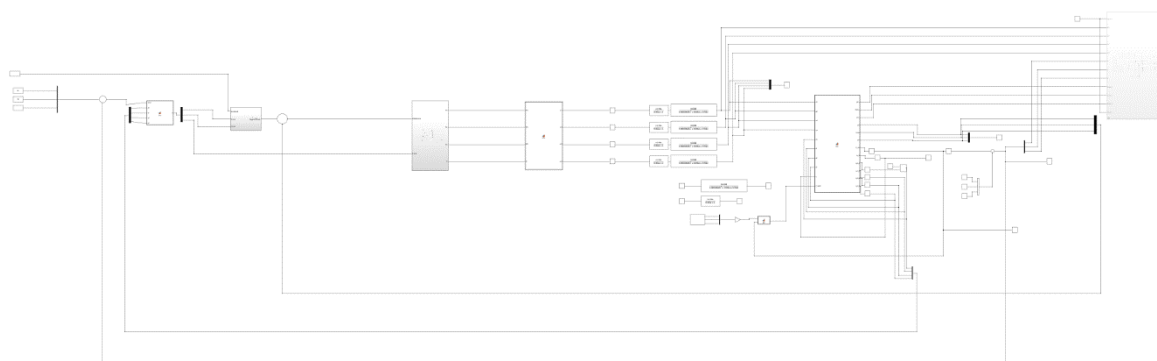
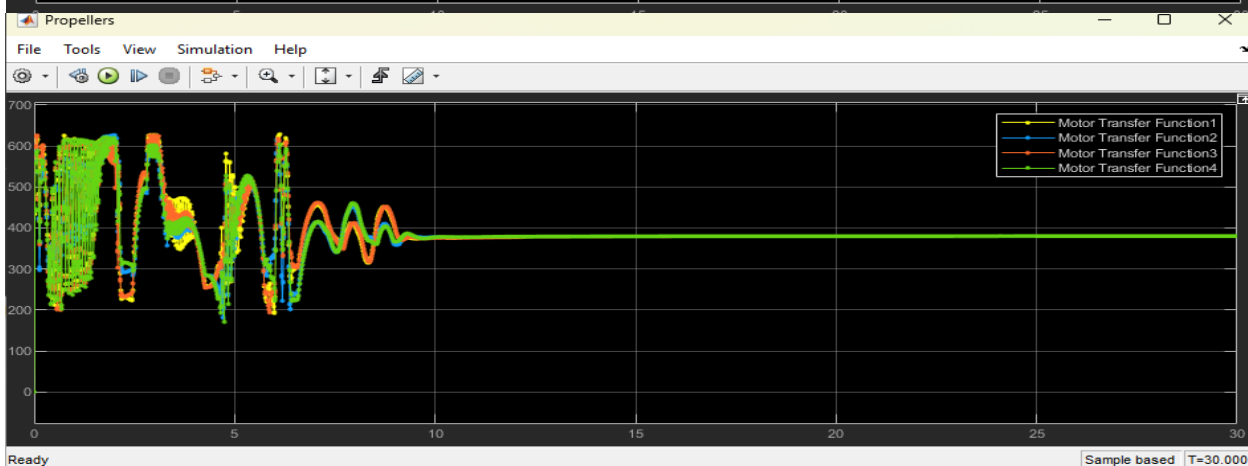
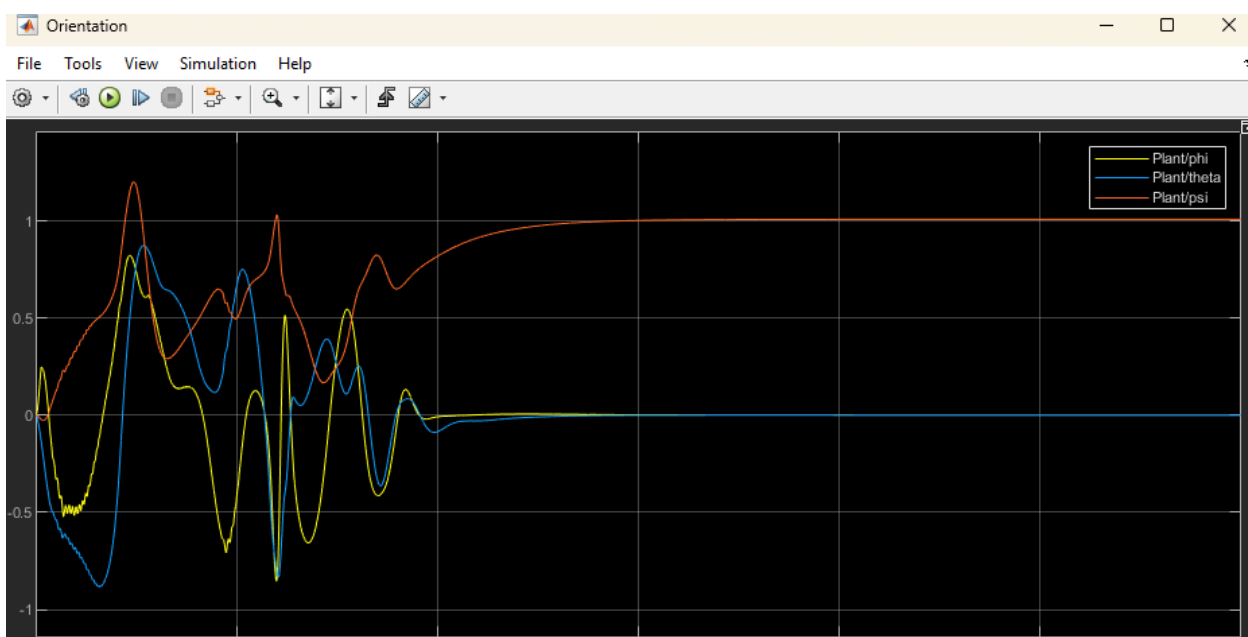
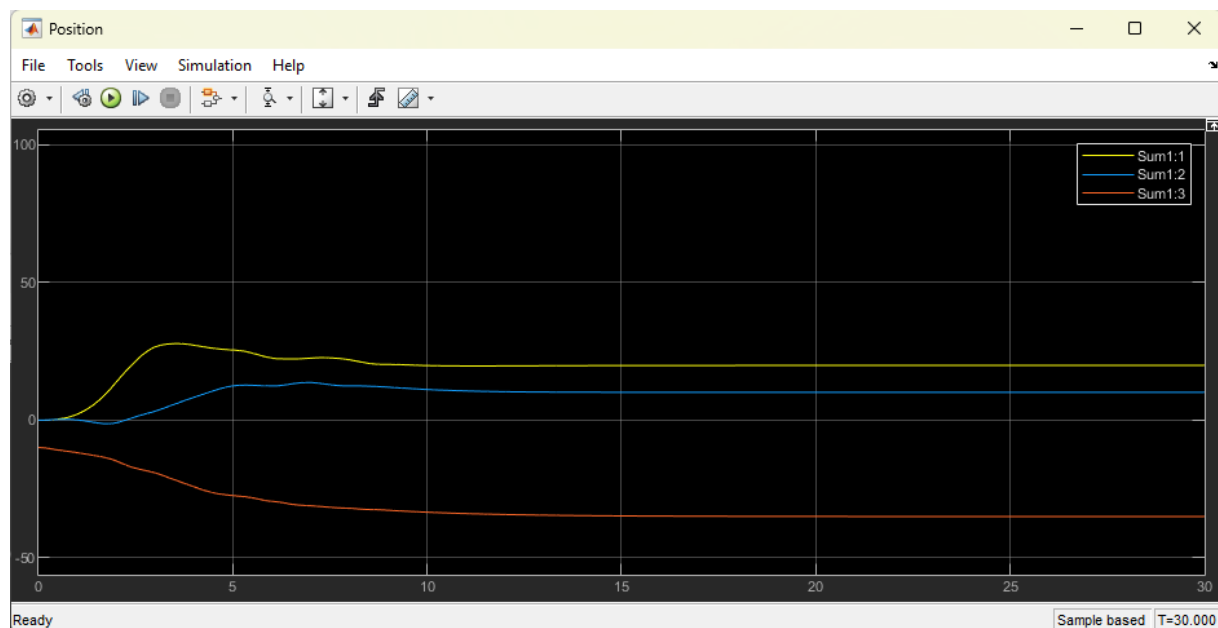


Figure 6: بلوک دیاگرام کنترل موقعیت

رفتار این پرنده برای موقعیت دلخواه و باد با سرعت 15 متر بر ثانیه در 3 تصویر زیر نمایش داده شده است. (زوایا بر اساس رادیان، موقعیت بر اساس متر و سرعت پره های به رادیان بر ثانیه است).



یکی از مشکلات در سیستم های پرنده استخراج داده های دقیق جهت گیری و موقعیت است. که تاکنون با استفاده از سنسور های مختلف و فیلتر های مختلف سعی بر افزایش دقت تخمین شده است. این بخش در قسمت پسخوراند کنترلر قرار میگیرد و با استفاده از داده های شتاب (شتابسنج) و داده های سرعت زاویه ای (ژیرو) و در بخش Hold Position با استفاده از داده های مکان پرنده (GPS)، زوایا و موقعیت پرنده را به کنترلر بدهید. در این بخش دادهای سنسور IMU ($a_x, a_y, a_z, g_x, g_y, g_z$) را با یک نویز نرمال جمع کنید و سپس وارد بلوک ناوبری کنید. (واریانس خطای سنسور ها از دیتاشیت استخراج کنید)

$$\begin{bmatrix} \ddot{a}_x = \ddot{a}_x + \mathcal{N}(0, \sigma_{ax}) \\ \ddot{a}_y = \ddot{a}_y + \mathcal{N}(0, \sigma_{ay}) \\ \ddot{a}_z = \ddot{a}_z + \mathcal{N}(0, \sigma_{az}) \\ \dot{g}_x = \dot{g}_x + \mathcal{N}(0, \sigma_{gx}) \\ \dot{g}_y = \dot{g}_y + \mathcal{N}(0, \sigma_{gy}) \\ \dot{g}_z = \dot{g}_z + \mathcal{N}(0, \sigma_{gz}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

بلوک ناوبری در واقع داده های سنسور ها را به پارامتر مورد نیاز تخصیص می دهد.

استفاده از سنسور IMU

Acceleration

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = R_I^B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\psi) & \cos(\theta) \sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ \cos(\psi) \sin(\theta) \sin(\phi) - \sin(\psi) \cos(\phi) & \sin(\psi) \sin(\theta) \sin(\phi) + \cos(\psi) \cos(\phi) & \sin(\phi) \cos(\theta) \\ \cos(\psi) \sin(\theta) \cos(\phi) + \sin(\psi) \sin(\phi) & \sin(\psi) \sin(\theta) \cos(\phi) - \cos(\psi) \sin(\phi) & \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a_x = -g \sin(\theta) \\ a_y = g \sin(\phi) \cos(\theta) \\ a_z = g \cos(\phi) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\theta = \text{asin}\left(-\frac{a_x}{g}\right) \quad (11)$$

$$\phi = \text{asin}\left(\frac{a_y}{g \cos(\theta)}\right) \quad (12)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (13)$$

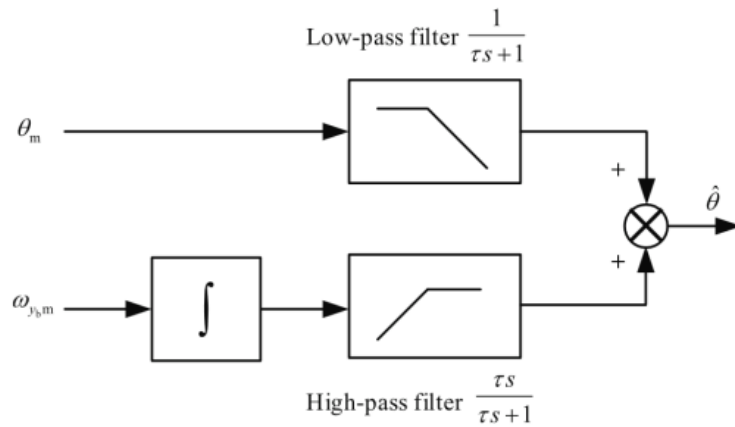
تبدیل سرعت زاویه ای به مشتقات اولیه

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \sin \theta / \cos \theta & \cos \phi \sin \theta / \cos \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{dt} \\ \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{dt} \\ \frac{\psi_{i+1} - \psi_i}{dt} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ \psi_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} dt + \phi_i \\ \dot{\theta} dt + \theta_i \\ \dot{\psi} dt + \psi_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

در ادامه با استفاده از فیلتر مکمل داده های زوایای استخراج شده از شتابسنج و ژایرو را با یکدیگر تلفیق کنید.



شکل ۳: بلوک دیاگرام فیلتر مکمل.

برای مدلسازی سنسور GPS از مدل Markov-Gauss استفاده شده است. این سنسور در فرکانس ۱Hz کار میکند یعنی که در هر ثانیه دیتا می دهد. و نویز این سنسور را میتوان به صورت زیر مدل کرد:

$$v[n+1] = e^{-K_{GPS}T_s}v[n] + \eta_{GPS}[n] \quad (17)$$

و در نهایت داده های مکان به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\begin{aligned} x_{GPS}[n] &= x_{feedback}[n] + v_x[n], \\ y_{GPS}[n] &= y_{feedback}[n] + v_y[n], \\ z_{GPS}[n] &= z_{feedback}[n] + v_z[n]. \end{aligned} \quad (18)$$

جدول ۳: پارامترهای سنسور GPS

		X	Y	Z
$V[n]$	نویز اعمالی به داده های GPS	$v_x[n]$	$v_y[n]$	$v_z[n]$
$1/K_{GPS}$	زمان پردازش GPS	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰
T_s	زمان نمونه برداری GPS	۱ (s)	۱ (s)	۱ (s)
$\eta_{GPS}[n]$	نویز نرمال	$\mathcal{N}(0, 0.21)$	$\mathcal{N}(0, 0.21)$	$\mathcal{N}(0, 0.4)$
$X_{feedback}$	داده های دقیق مکان پرنده	$x_{feedback}$	$y_{feedback}$	$z_{feedback}$
X_{GPS}	داده های GPS مکان پرنده	x_{GPS}	y_{GPS}	z_{GPS}

برای طراحی سیستم حسگر IMU و GPS یک حلقه خارجی ایجاد می‌کنیم که در آن اطلاعات دینامیکی واقعی دریافت شده و با افزودن خطای رندوم با توزیع گوسی، نویز حسگر را شبیه سازی می‌کنیم.

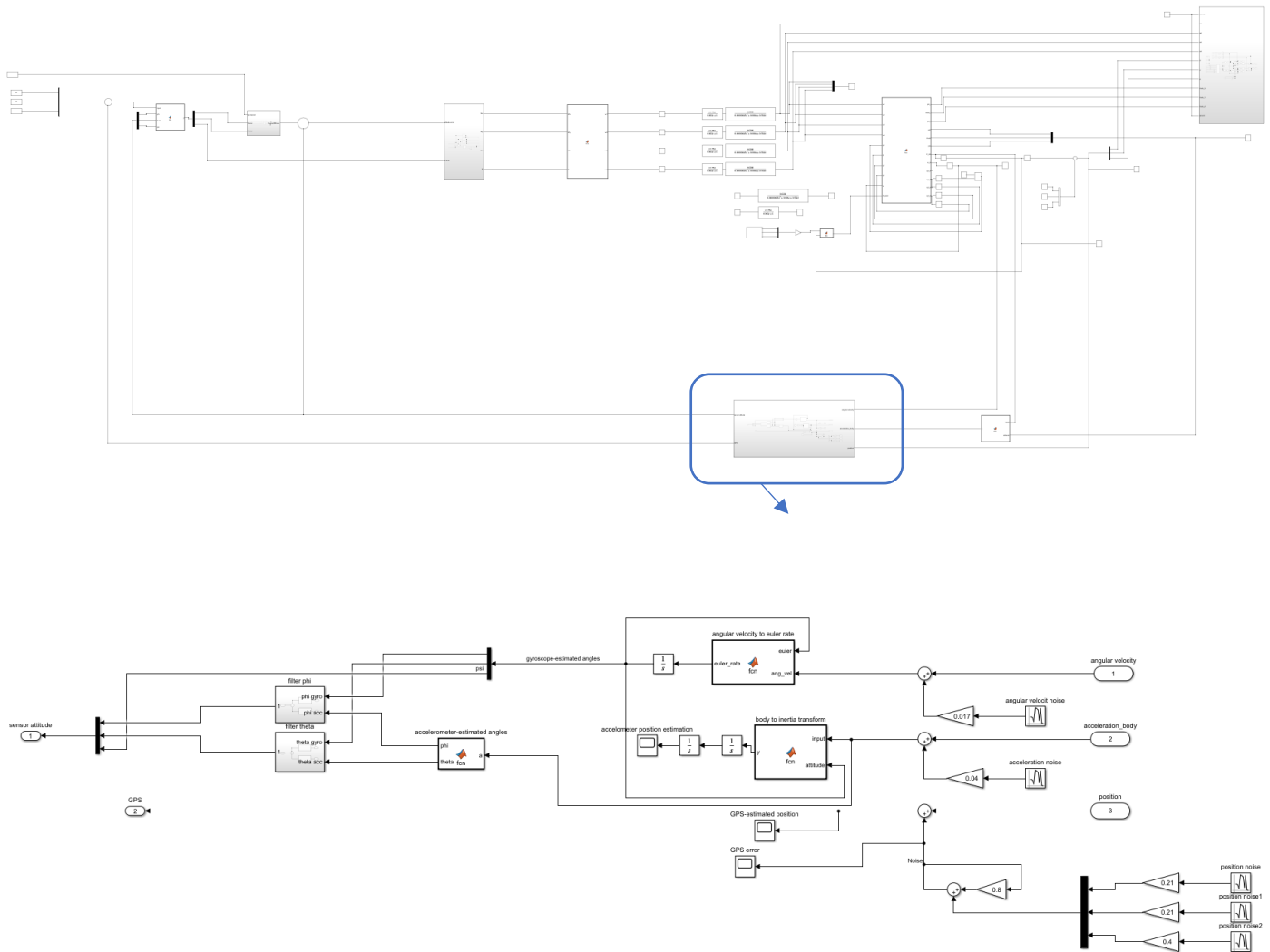
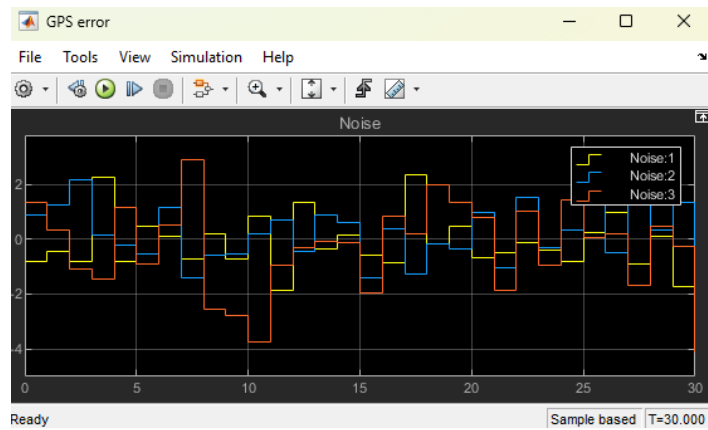


Figure 7: بلوک دیاگرام شبیه سازی اثر سنسورها

همانطور که در تصویر 7 مشاهده می‌شود، به جای دادن داده‌های اصلی به ورودی کنترلر، از داده‌های سنسورها استفاده می‌شود. برای به دست آوردن نویز شتابسنج و ژيروسکوپ از دیتاشیت آنها استفاده می‌کنیم. معمولاً واریانس نویز حسگرها با جذر باند فرکانسی آنها رابطه خطی دارند؛ در نتیجه:

$$\sigma_{noise} = \sqrt{bandfrequency} * C_{noise \text{ performance coefficient}}$$

بر این اساس و اینکه ژيروسکوپ و شتابسنج انتخاب شده، هر دو در باند فرکانسی نزدیک 100 هرتز کار می‌کنند، محاسبه می‌شود که واریانس خطای شتاب سنج برابر با $0.04m/s^2$ و واریانس خطای ژيروسکوپ در حدود $0.017rad/s$ است. همچنین با استفاده از تقریب Markov-Gauss برای خطای GPS، و اینکه زمان پروسه محاسبه موقعیت توسط GPS در حدود 0.2 ثانیه است، ضریب کاهش را در حلقه 0.8 در نظر می‌گیریم. در نهایت خطای اعمال شده بر موقعیت توسط GPS به شکل نمودار زیر می‌شود.



در صورتی که با استفاده از بلوک quantizer سیمولینک، فرکانس نمونه برداری IMU برابر 100Hz قرار دهیم، رفتار سیستم تقریباً با حالت پیوسته تفاوتی نمی‌کند ولی اگر فرکانس 1Hz را برای GPS استفاده کنیم، کنترل موقعیت ناممکن می‌شود در نتیجه باید داده‌های شتابسنج با فیلتر عبور فرکانس بالا و داده‌های GPS را با فیلتر عبور فرکانس پایین ترکیب کنیم. در اینجا برای اینکه خواسته مسئله نبوده، از quantizer استفاده نشده و در نتیجه مشکلی در زمینه کنترل نداریم.

همچنین برای ترکیب زوایای خوانده شده توسط ژيروسکوپ و شتابسنج، از فیلترهای زیر با ثابت زمانی 0.01 s استفاده شده است.

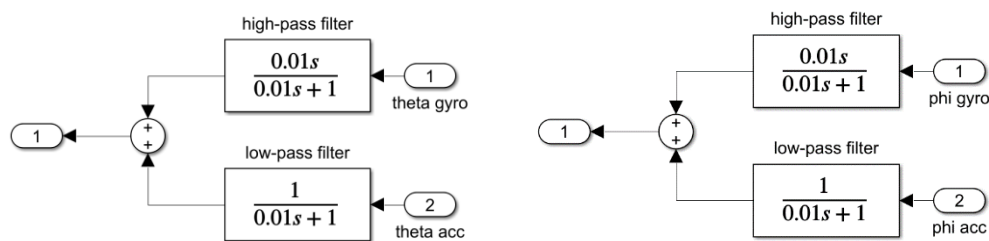
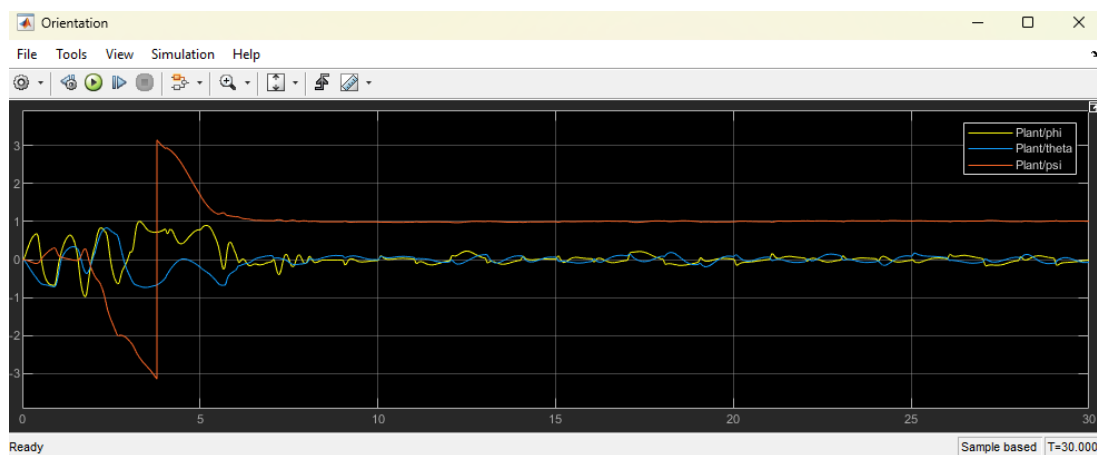
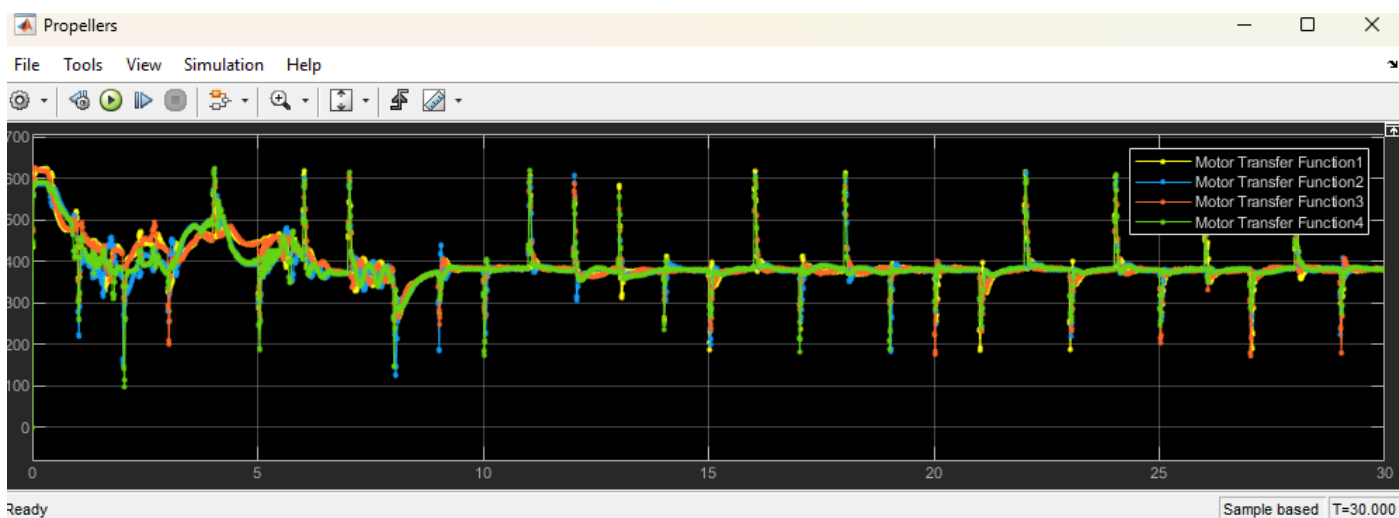
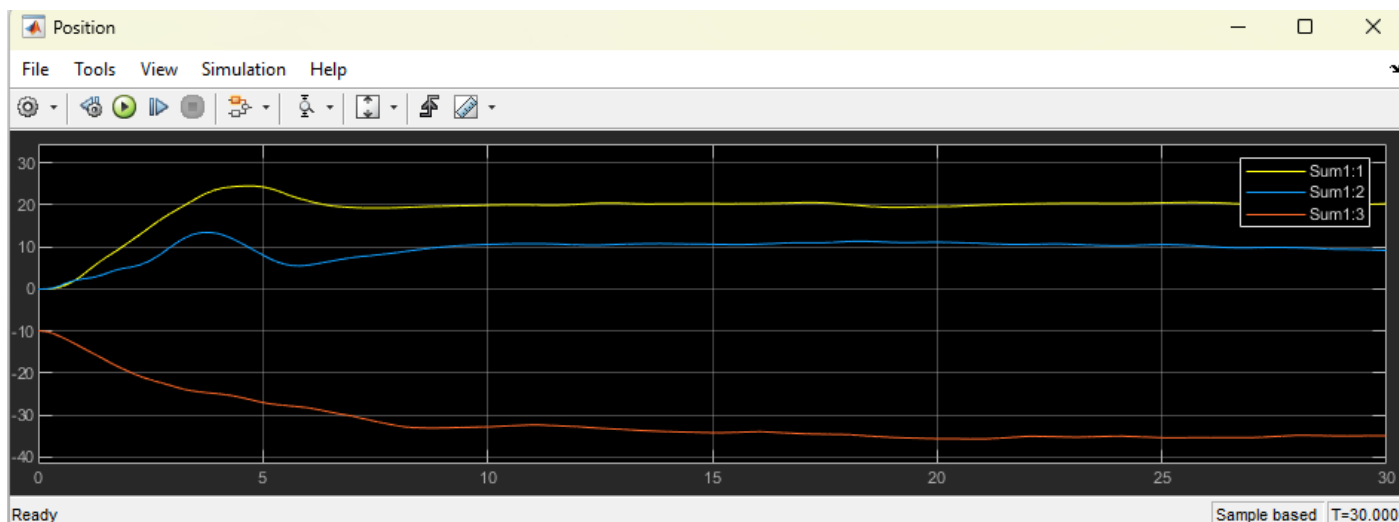


Figure 8: فیلتر ترکیب زوایای ژيروسکوپ و شتابسنج

در نهایت رفتار سیستم برای رسیدن به موقعیت دلخواه در نمودارهای زیر نمایش داده شده است. (زوایا بر اساس رادیان، موقعیت بر اساس متر و سرعت پره‌های به رادیان بر ثانیه است).





هدایت

در مولتی روتور ها معمولا این بخش به کمک دسته کنترلی ایجاد می شود. در این بخش شما با طراحی یک مسیر و در ادامه با زمانبند کردن مسیر، Trajectory را به شبیه سازی شده اضافه می کنید.

در این سوال سوال میخواهیم پرنده شما را بر روی مسیرهای پیچیده و سخت تست کنیم. بدین منظور برای یکی از انواع منحنی معرفی شده، اگر پارامترهای منحنی داده نشده باشد، به طور دلخواه خودتان پارامترها انتخاب کنید. ابتدا برای یکی از منحنی ها، معادله پارامتریزه شده را بدست آورده و آن را رسم کنید. سپس آنها را به صورت ورودی دلخواه به پرنده داده (با استفاده از بلوک Lookup Table) و با استفاده از بلوک های spline و waypoints کتابخانه simscape پرواز پرنده را همراه با مسیر شبیه سازی کنید. همچنین خطای تبعیت مسیر را برای مدل انتخابی حساب کرده و گزارش کنید.

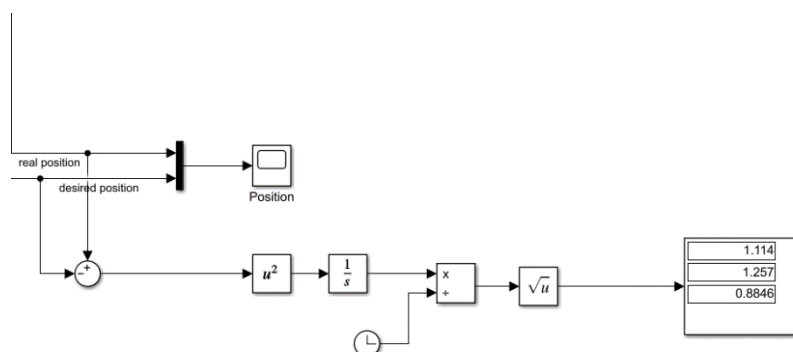
مسیر انتخابی از نوع Capareda Curve خواهد بود. معادله پارامتری این مسیر به شکل زیر است. [11]

$$x = a * ((q - 1) * \cos(u) + k * \cos((q - 1) * u)) - a * (q - 1 + k)$$

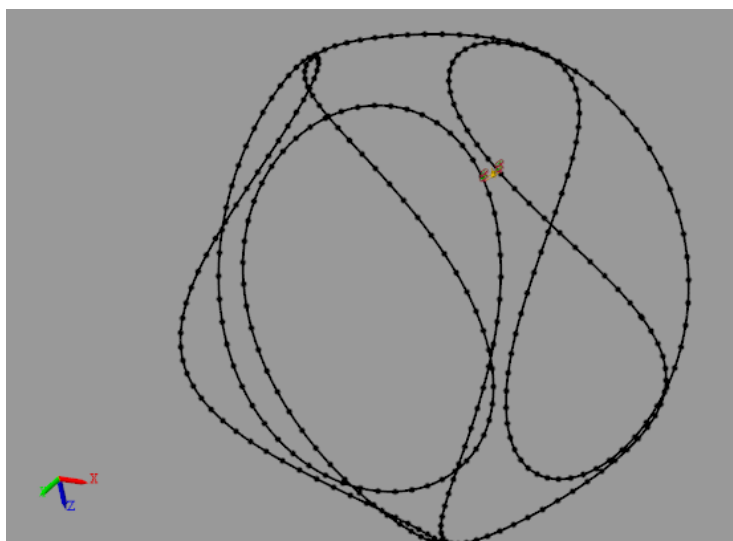
$$y = a * ((q - 1) * \sin(u) - k * \sin((q - 1) * u))$$

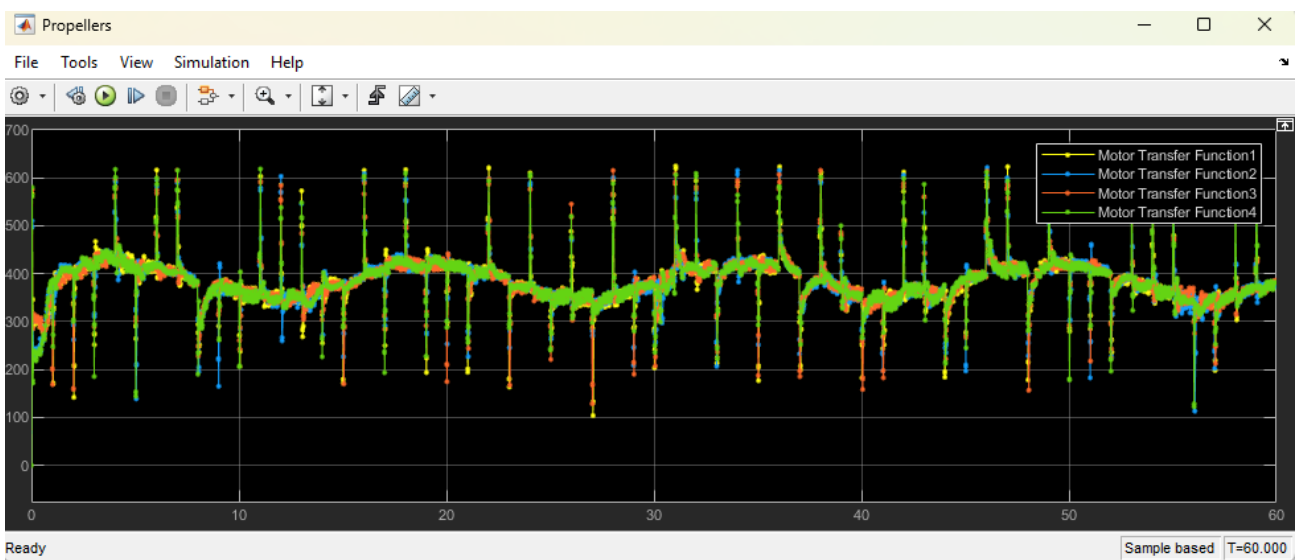
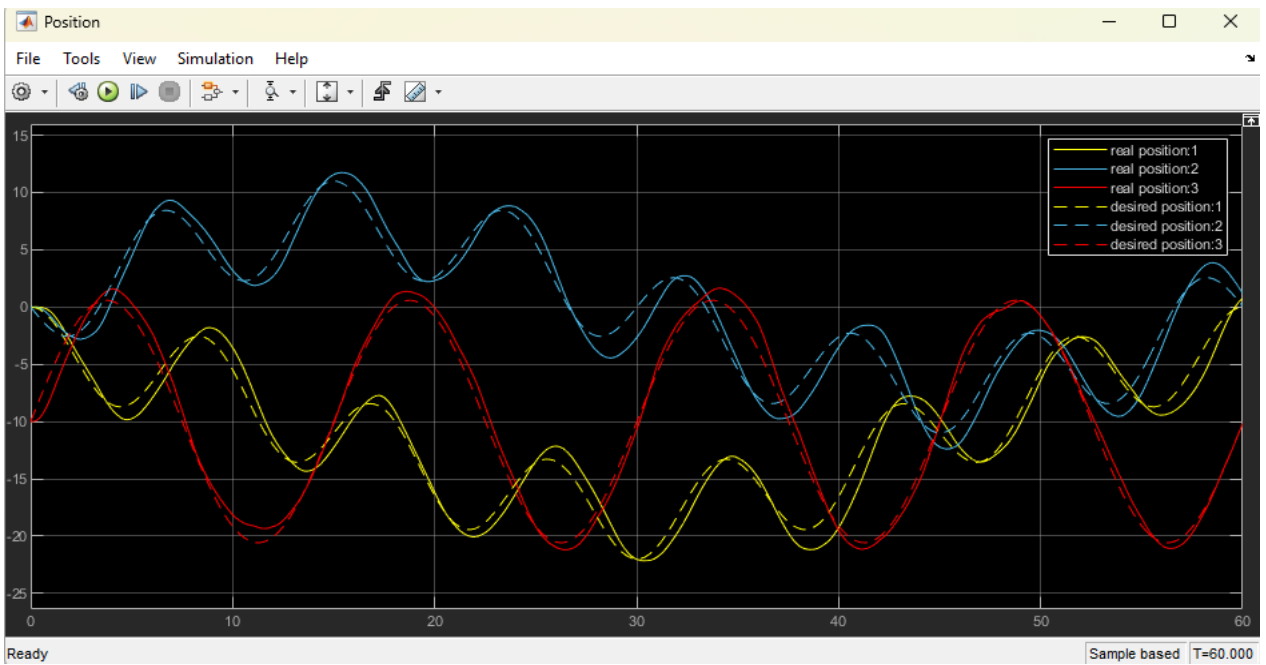
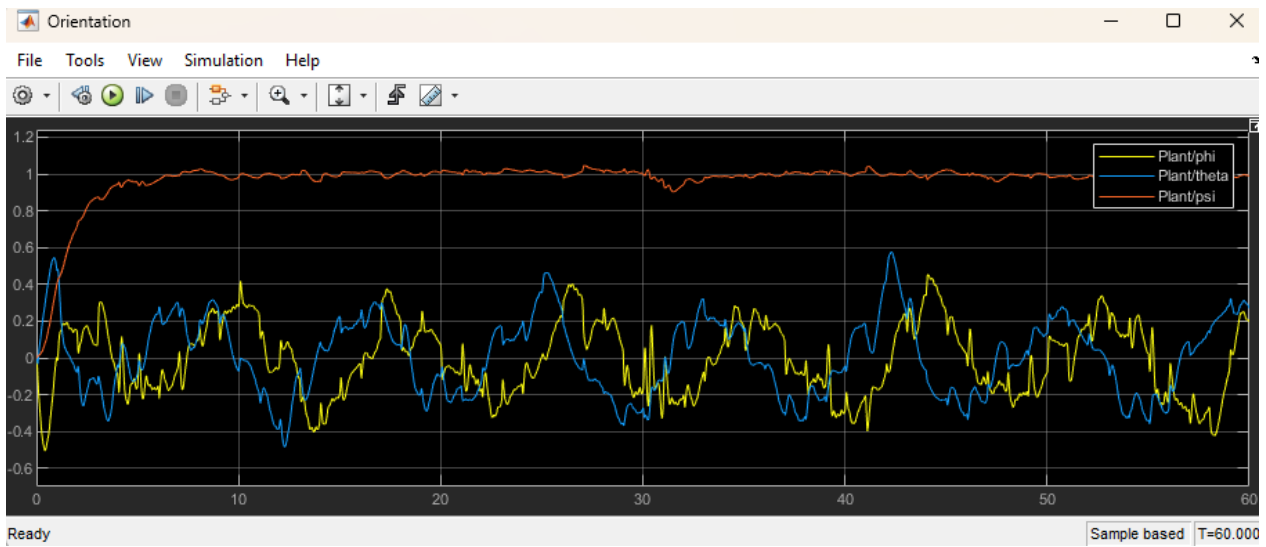
$$z = b * \sin(0.5 * q * u) - 10$$

این مسیر در کد "path_points.m" آمده است. ابتدا باید این کد ران شده و به این شکل متغیرهای مورد نیاز در workspace ذخیره می‌شوند. سپس فایل "PATH_FOLLOWING.slx" ران می‌شود. در فایل سیمولینک، با استفاده از بلوک "1-D look up table" مسیر دلخواه بر حسب زمان به پرنده داده می‌شود. همچنین می‌توان yaw مورد نظر را بر حسب زمان به پرنده داد. در اینجا زاویه دلخواه yaw برابر با 1.0 رادیان در نظر گرفته شده است. در نهایت مشاهده می‌شود که پرنده با واریانس کمتر از 1 متر، مسیر را دنبال می‌کند. فیلم شبیه سازی در فایل "PATH_FOLLOING.mp4" قابل مشاهده است. برای محاسبه خطای MSE از بلوک زیر استفاده می‌کنیم.



همچنین رفتار پرنده طی این شبیه سازی در نمودارهای زیر قابل مشاهده است. (زوایا بر اساس رادیان، موقعیت بر اساس متر و سرعت پره های به رادیان بر ثانیه است).





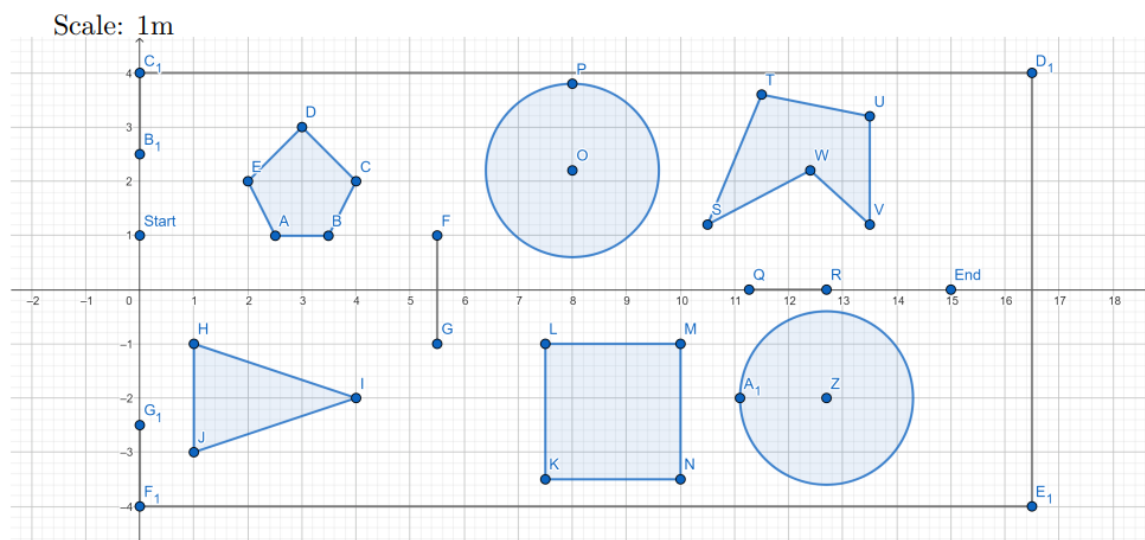
فرض کنید پرنده موردنظر قرار است در داخل اتاقی با ارتفاع سقف ۶ متر پرواز کند. موانعی همانند شکل زیر در داخل اتاق وجود دارد که به صورت سراسر در راستای ارتفاع گسترش یافته‌اند (یعنی می‌توان از دید بالا، موانع و محیط را به صورت صفحه‌ای مدل کرد). می‌خواهیم پرنده از نقطه‌ی شروع به پایان برود و در این حین نه تنها به موانع و دیوارهای اتاق نخورد بلکه با آنها فاصله فاصله اطمینان را نیز رعایت کند. فاصله اطمینان ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین یک دهم اول و آخر مسیری طی شده به ترتیب صرف برخاست و نشست پرنده می‌شود. ارتفاع مطلوب پرواز ۳ متر نسبت به سطح زمین اتاق می‌باشد. از طرفی به جز مراحل برخاست و نشست، ارتفاع پرنده کمتر از ۲ متر و بیشتر از ۴ متر نشود. با شرایط گفته شده، کدی را برای مسیریابی بین موانع از مبدأ تا مقصد را بنویسید و با اجرای آن یک انیمیشن از نمودار سه بعدی محیط و موانع با حد بالا و پایین پرواز، از حرکت پرنده در محیط ارائه کنید. برای رعایت کردن فاصله اطمینان می‌توانید از قضیه Minkowski Sum استفاده کنید. برای پیدا کردن مسیر بین موانع در صورت ارائه و توضیح روند، محدودیتی وجود ندارد. به عنوان مثال، می‌توانید از روش گرادینان جاذبه و دافعه استفاده کنید. توجه داشته باشید در هر لحظه هدینگ پرنده باید مماس بر مسیر باشد.

* اگر فاصله نقاط زیاد باشد به دلیل ایجاد خطای لحظه‌ای بالا در کنترلر باعث ناپایداری خواهد شد می‌توانید با میانبازی نقاط و فیلتر کردن نقاط تیز، مسیر را صاف و نرم تر کنید.
* پرنده را به صورت نقطه‌ای در نظر بگیرید.
روش‌های پیشنهادی طراحی مسیر در حضور موانع

• Dijkstra

• Gradient based path planning

• Rapidly Exploring Random Tree (RRT)

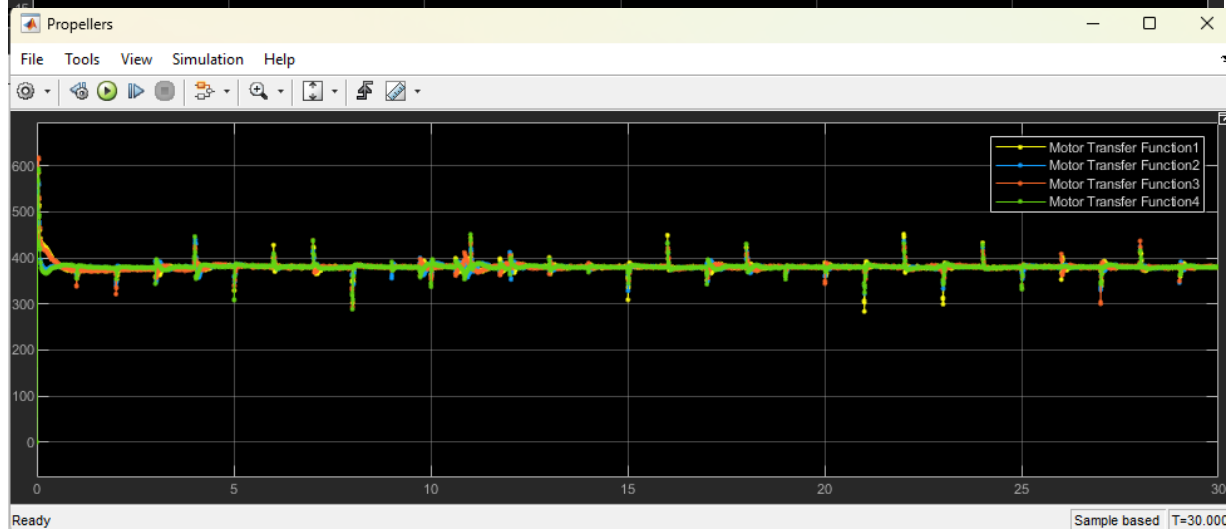
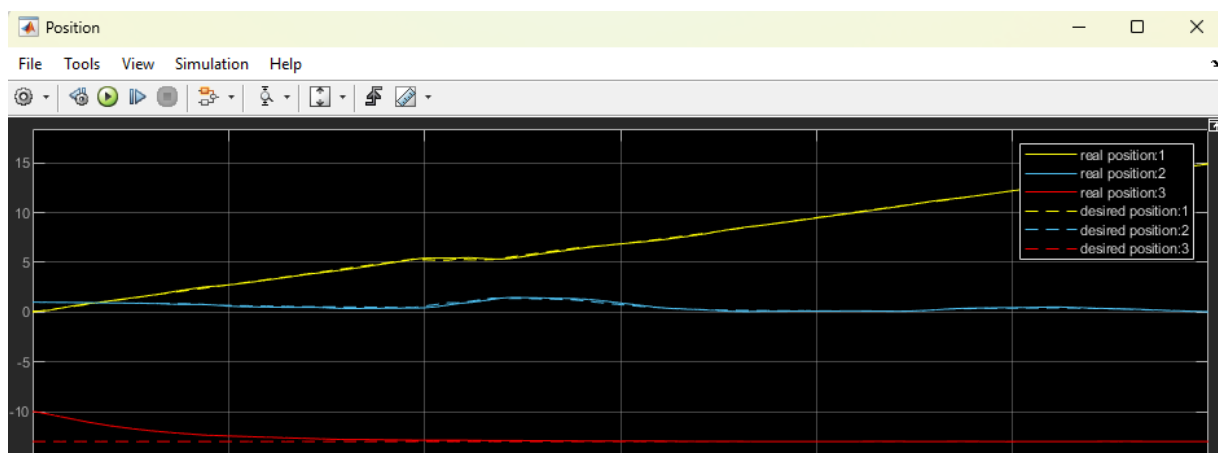


مختصات نقاط به شرح زیر است:

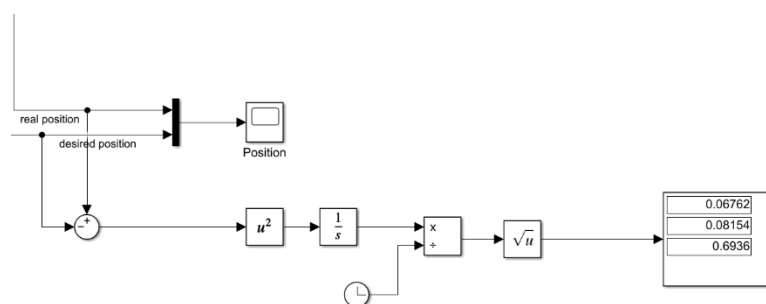
$L = (7.5, -1)$	$H = (1, -1)$	$D = (3, 3)$	$Start = (0, 1)$
$M = (10, -1)$	$I = (4, -2)$	$E = (2, 2)$	$A = (2.5, 1)$
$N = (10, -3.5)$	$J = (1, -3)$	$F = (5.5, 1)$	$B = (3.5, 1)$
$G_1 = (0, -2.5)$	$B_1 = (0, 2.5)$	$U = (13.5, 3.2)$	$P = (8, 3.8)$
$End = (15, 0)$	$C_1 = (0, 4)$	$V = (13.5, 1.2)$	$Q = (11.2, 0)$
	$D_1 = (16.5, 4)$	$W = (12.4, 2.2)$	$R = (12.7, 0)$
	$E_1 = (16.5, -4)$	$Z = (12.7, -2)$	$S = (10.5, 1.2)$
	$F_1 = (0, -4)$	$A_1 = (11.1, -2)$	$T = (11.5, 3.6)$

همچنین فیلم پیمایش نیز در فایل PATH_PLANNING_AND_OBSTACLE_AVOIDANCE.mp4 آورده شده. با اینکه پرنده با واریانس خطای کمتر از 10 سانتی متر مسیر را دنبال می کند، به علت ابعاد بزرگ آن، در بعضی نقاط با موانع برخورد دارد.

رفتار پرنده در نمودارهای زیر قابل مشاهده است. (زوایا بر اساس رادیان، موقعیت بر اساس متر و سرعت پره های به رادیان بر ثانیه است).



همانطور که از نمودارها پیداست، پرنده با واریانس کمتر از 10 سانتی متر، مسیر را دنبال می کند.



1. <https://www.t-drones.com/product/MX860.html>
2. <https://www.gwdbi.com/products/gwd-h-800t-stable-5kg-payload-portable-design-unlimited-power-supply-carbon-fiber-tethered-lighting-drone-with-camera-speakers>
3. <https://store.tmotor.com/goods.php?id=458>
4. https://store.tmotor.com/product/polish-carbon-fiber-22x6_6-prop.html
5. <https://www.motionew.com/shop/power-solution/zye-power-ultra-hv-semi-solid-state-battery-7s-35000mah/#description>
6. https://hobbyking.com/en_us/hobbyking-red-brick-2-7s-70a-esc-v2.html?store=en_us
7. <https://www.speedybee.com/speedybee-f405-mini-bls-35a-20x20-stack/>
8. <https://www.sparkfun.com/products/retired/11234>
9. <https://rekonfpv.com/products/hglrc-m100-5883-gps>
10. <https://www.rjxhobby.com/rjx-1450mm-4-axis-carbon-fiber-folding-quadcopter-frame-without-motor-mounts>
11. <https://mathcurve.com/courbes3d.gb/capareda/capareda.shtml>