

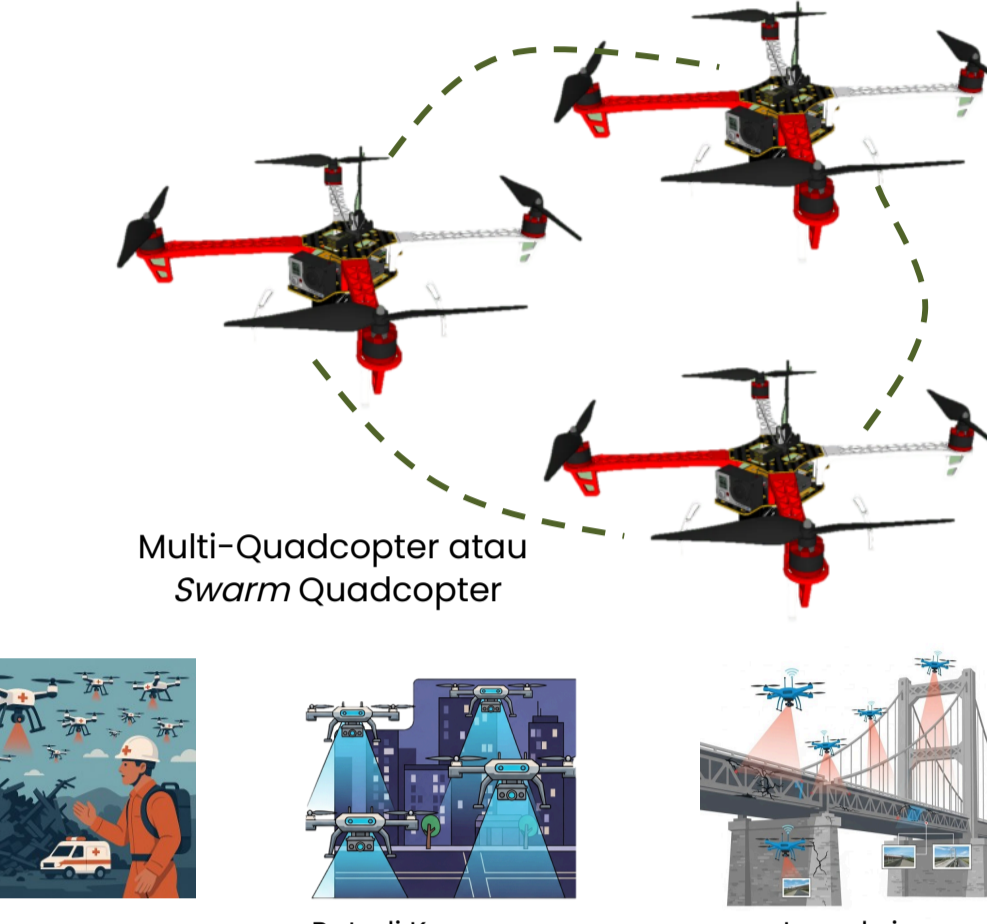


Nama Penyusun : Izma Alhazmi Herdian (13321027)
 Dosen Pembimbing : Ir. Estiyanti Ekawati, M.T., Ph.D.
 Faqihza Mukhlis, S.T., M.T., Ph.D.

BERBASIS *IMPROVED ARTIFICIAL POTENTIAL FIELD* DAN *EVENT-BASED RECONFIGURATION CONTROL*

LATAR BELAKANG

Quadcopter atau quadrotor adalah salah satu jenis *unmanned aerial vehicle* (UAV) yang menggunakan 4 rotor untuk bermanuver di udara



Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi wahana udara tak berawak (*Unmanned Aerial Vehicle*/UAV), khususnya dalam bentuk sistem multi-quadcopter, telah berkembang pesat dan membuka peluang untuk berbagai aplikasi kompleks seperti pencarian korban di area luas, patroli keamanan otomatis, dan inspeksi infrastruktur.

Metode Kontrol Formasi

Metode *Artificial Potential Field* (APF) bekerja dengan membayangkan setiap quadcopter ditarik ke tujuan oleh gaya tarik dan pada saat yang sama ditolak dari rintangan atau quadcopter lain oleh gaya tolak. Metode *Improved APF* (IAPF) kemudian menyempurnakan APF dengan menambahkan "gaya formasi" yang secara aktif menjaga agar susunan geometris kawanan tetap terjaga sesuai topologi yang diinginkan. Sementara itu, *Event-based Reconfiguration Control* (ERC) adalah strategi adaptif yang membuat kawanan bisa berpindah perilaku secara dinamis; saat mendeteksi ruang sempit, sistem dapat beralih dari mode formasi ke mode *tailgating* (mengantre atau mengikuti satu agen di depannya), sehingga kawanan dapat "merampingkan diri" untuk melewati rintangan tersebut.

Terdapat tantangan utama:

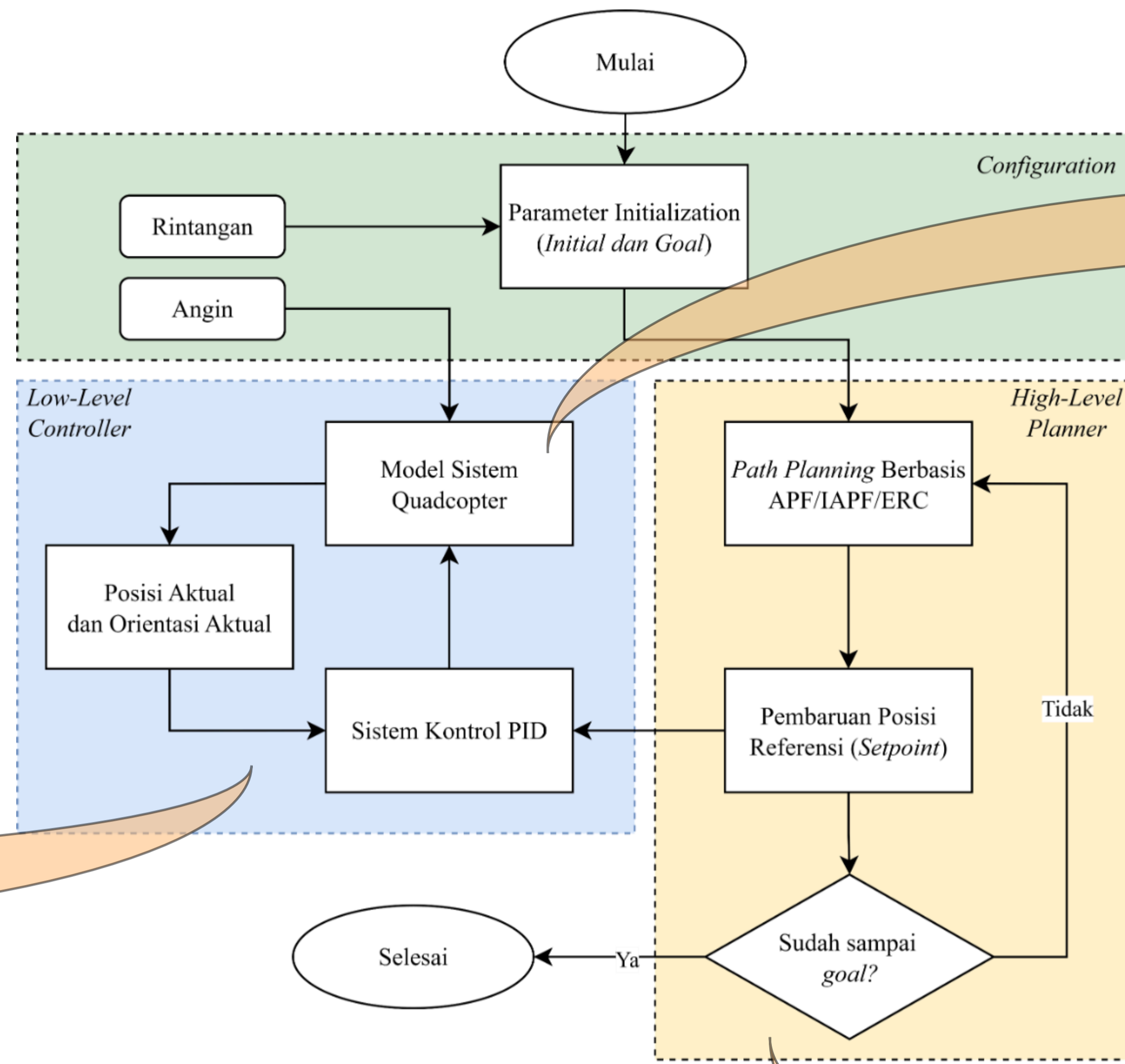
1. Navigasi ke titik tujuan
2. Menghindari rintangan
3. Mencegah tabrakan antar-agen
4. Mempertahankan formasi
5. Adaptasi di ruang sempit
6. Stabilitas melawan gangguan angin

Dibutuhkan

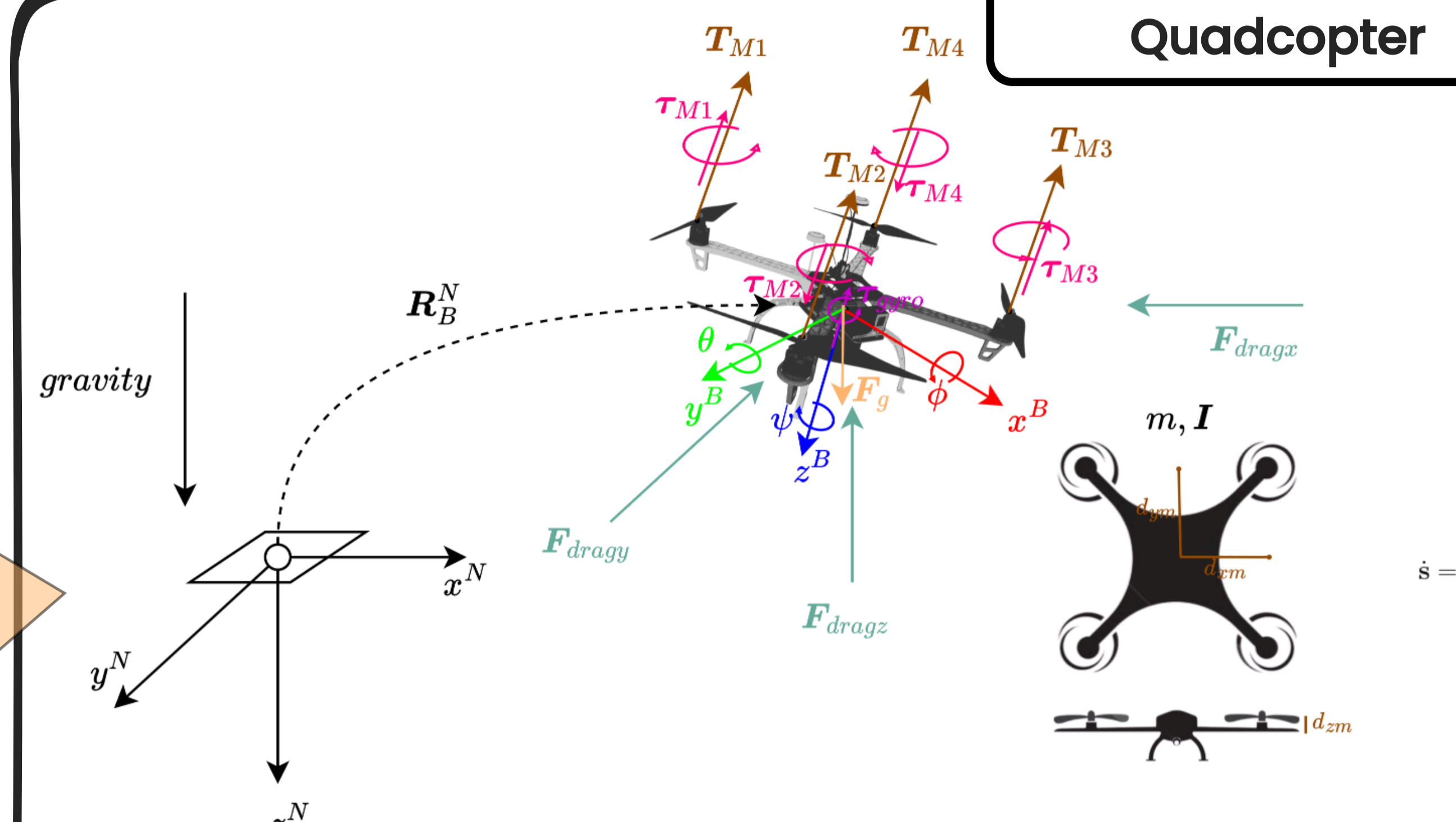
Sistem Kontrol Formasi yang Adaptif

ARSITEKTUR SISTEM

Sistem ini dirancang menggunakan arsitektur kontrol bertingkat yang membagi tugas menjadi dua level utama. *High-Level Planner* bertindak sebagai otak yang menentukan strategi dan tujuan kolektif kawanan. Sementara itu, *Low-Level Controller* pada setiap quadcopter bertindak sebagai eksekutor yang secara presisi menjalankan perintah dari otak untuk menjaga stabilitas dan pergerakan fisik wahana.



Model Sistem Quadcopter

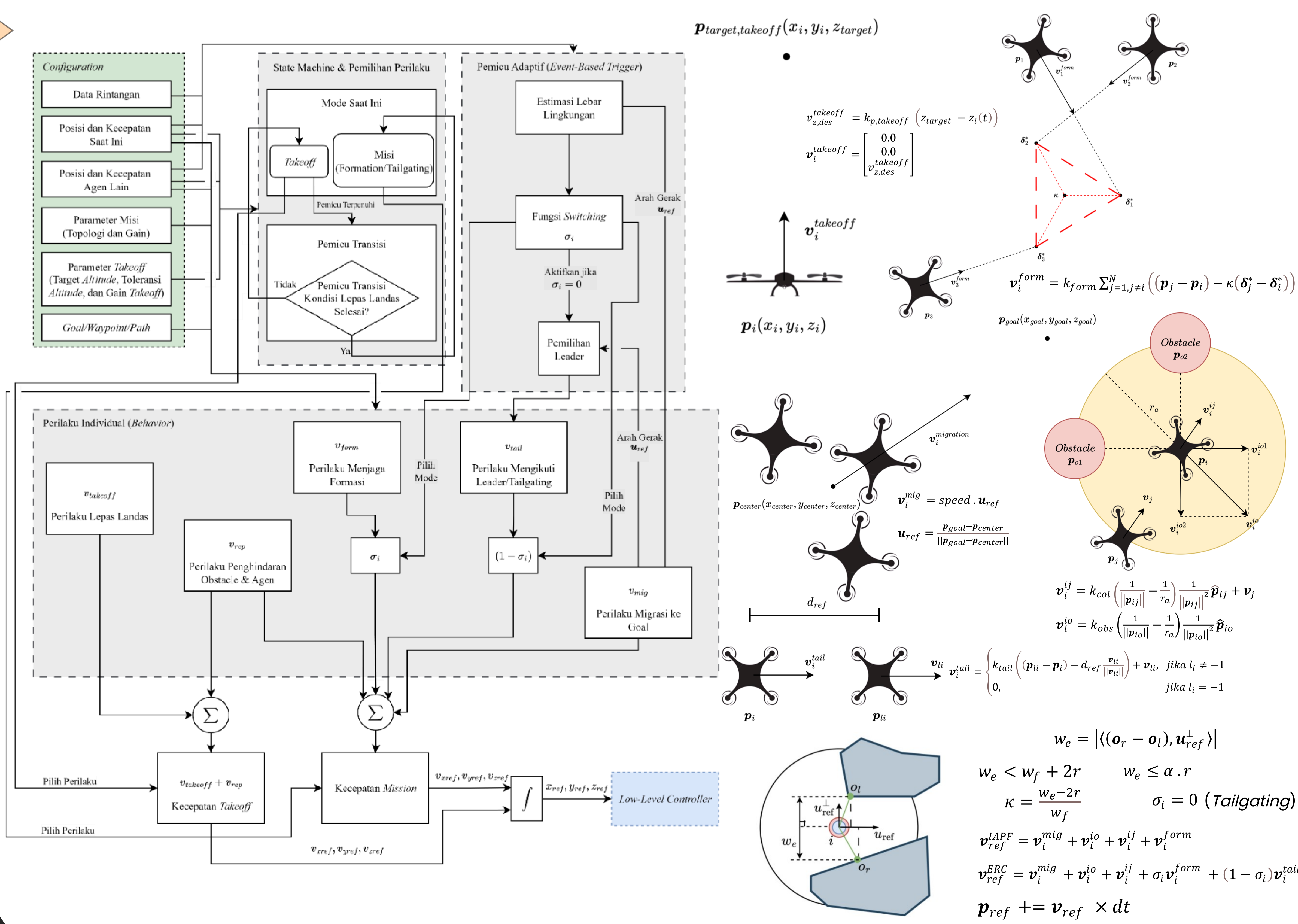


Untuk mendapatkan model sistem yang akurat, persamaan gerak diturunkan menggunakan *toolkit* Python Dynamic (PyDy) yang menerapkan Metode Kane. Metode ini menghasilkan satu set persamaan *state-space* dengan menggunakan *Dormand-Prince 5(4)* yang menggabungkan dinamika fisik bodi quadcopter (*Plant*) dengan respons dinamis dari motor-motornya (*Actuator*). Dengan model ini, simulasi dapat merepresentasikan perilaku terbang wahana secara realistis sebagai respons terhadap sinyal kontrol yang diberikan.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -0.5(\omega_x q_x + \omega_y q_y + \omega_z q_z) \\ \dot{y} &= 0.5(\omega_x q_y - \omega_y q_x + \omega_z q_z) \\ \dot{z} &= 0.5(\omega_x q_z + \omega_y q_y - \omega_z q_x) \\ \dot{q}_x &= -0.5(\omega_x q_y - \omega_y q_x - \omega_z q_z) \\ \dot{q}_y &= C_d \text{sign}(v_x \cos q_{o2} \cos q_{o2} - \dot{z})(v_x \cos q_{o1} \cos q_{o2} - \dot{z}) - 2(q_x \omega_y + q_y \omega_x)(T_{M1} + T_{M2} + T_{M3} + T_{M4}) \\ \dot{q}_z &= C_d \text{sign}(v_x \sin q_{o2} \cos q_{o2} - \dot{z})(v_x \sin q_{o1} \cos q_{o2} - \dot{z}) - (T_{M1} + T_{M2} + T_{M3} + T_{M4})(q_x^2 - q_y^2 + q_z^2) + g_m D \\ \dot{\psi} &= \frac{m_B}{m_B} \\ \dot{\theta} &= \frac{(I_{Bxx} - I_{Bzz})\omega_x \omega_z - \omega_y I_{Bxz}(\omega_{M1} - \omega_{M2} + \omega_{M3} - \omega_{M4})\omega_z + (T_{M1} - T_{M2} - T_{M3} + T_{M4})d_{wm}}{I_{Bxx}} \\ \dot{\phi} &= \frac{(I_{Bxx} - I_{Bzz})\omega_x \omega_z + \omega_y I_{Bxz}(\omega_{M1} - \omega_{M2} + \omega_{M3} - \omega_{M4})\omega_x + (T_{M1} + T_{M2} - T_{M3} - T_{M4})d_{wm}}{I_{Bxx}} \\ \dot{\omega}_x &= \frac{I_{Bxx}}{I_{Bxx}} \\ \dot{\omega}_y &= \frac{I_{Bxx}}{I_{Bxx}} \\ \dot{\omega}_z &= \frac{I_{Bxx}}{I_{Bxx}} \\ \dot{\omega}_{M1} &= -2\xi\omega_{M1} - \omega_{M1} + k_p u_{M1} \\ \dot{\omega}_{M2} &= -2\xi\omega_{M2} - \omega_{M2} + k_p u_{M2} \\ \dot{\omega}_{M3} &= -2\xi\omega_{M3} - \omega_{M3} + k_p u_{M3} \\ \dot{\omega}_{M4} &= -2\xi\omega_{M4} - \omega_{M4} + k_p u_{M4} \end{aligned}$$

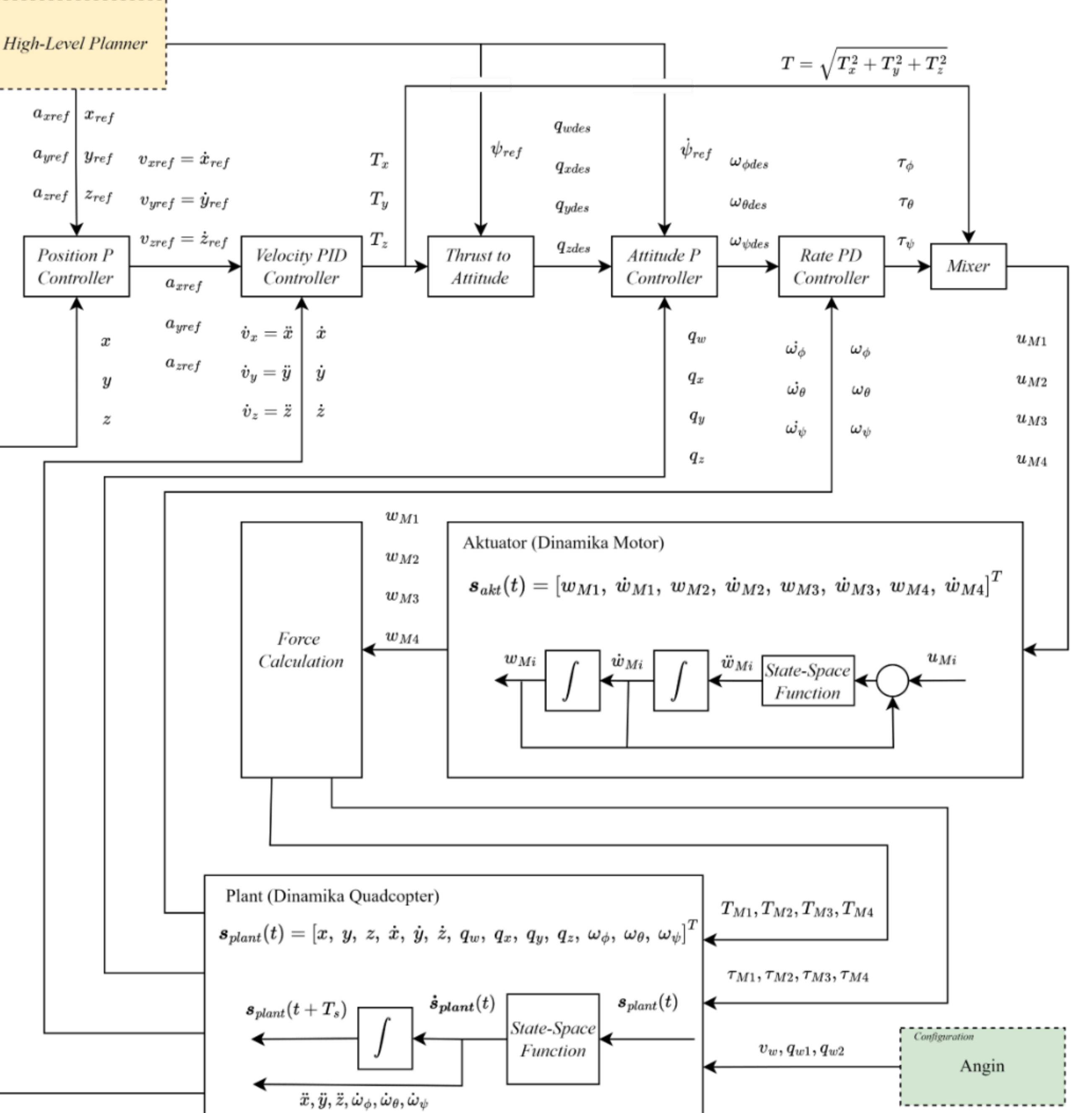
High-Level Planner

High-Level Planner pertama-tama memproses berbagai data masukan seperti informasi rintangan, keadaan wahana saat ini, serta parameter misi. Inti dari planner ini adalah sebuah *State Machine* yang menentukan mode operasi (lepas landas atau misi). Dalam mode misi, Pemicu Adaptif (ERC) akan mengestimasi lebar lingkungan untuk mengaktifkan fungsi peralihan (σ_i) Fungsi ini secara dinamis memilih dan menggabungkan vektor kecepatan dari berbagai *Perilaku Individual*, seperti lepas landas ($v_i^{takeoff}$), menjaga formasi (v_i^{form}), mengikuti pemimpin (v_i^{tail}), menghindari rintangan (v_i^{obs} & v_i^{ij}), dan bergerak menuju tujuan (v_i^{mig}). Hasil kombinasi dari perilaku-perilaku ini menghasilkan vektor kecepatan akhir yang menjadi perintah navigasi untuk dieksekusi oleh *low-level controller*.



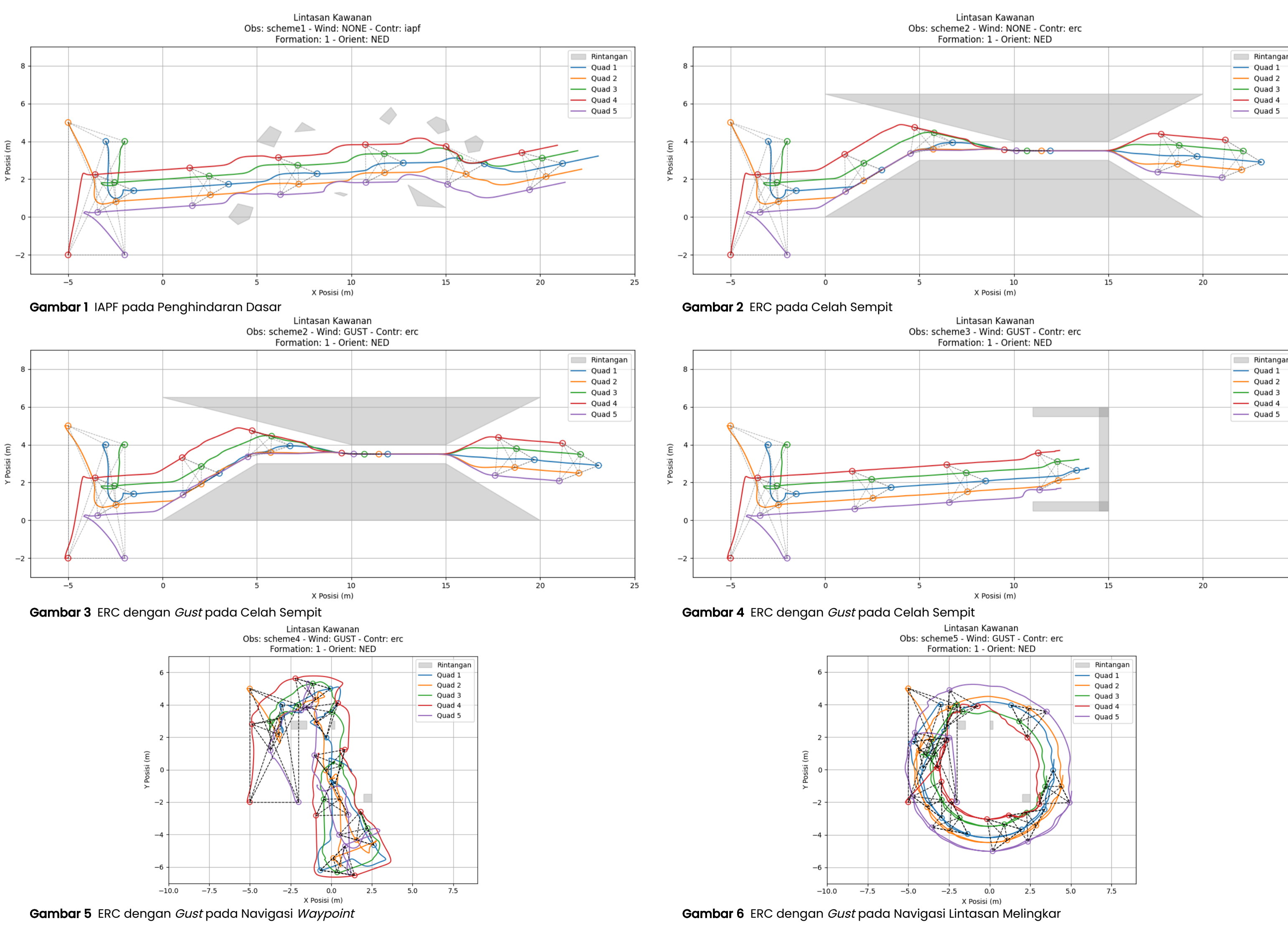
Low-Level Controller

Low-Level Controller menggunakan arsitektur *PID bertingkat* untuk menerjemahkan setpoint posisi yang diterima dari *high-level planner* menjadi sinyal perintah untuk masing-masing motor



HASIL DAN ANALISIS

1. **Uji Penghindaran Dasar:** Pada rintangan sederhana, strategi IAPF berhasil memandu kawanan dengan formasi yang stabil, seperti pada Gambar 1.
2. **Uji Celah Sempit:** Strategi IAPF yang kaku gagal melewati celah sempit, namun strategi adaptif ERC berhasil dengan mengubah formasi menjadi barisan (Gambar 2).
3. **Uji Gangguan Angin:** Sistem terbukti tangguh, di mana lintasan sukses ERC pada Gambar 3 nyaris tidak berubah bahkan saat diterpa hembusan angin.
4. **Uji Jebakan Topologis:** Batasan sistem teridentifikasi saat strategi ERC gagal dan terjebak dalam rintangan berbentuk "U" atau *U-Trap* (Gambar 4).
5. **Uji Navigasi Waypoint:** Sistem berhasil divalidasi untuk mengikuti serangkaian *waypoint* secara presisi sambil menjaga formasi dinamis (Gambar 5).
6. **Uji Lintasan Melingkar:** Kemampuan melacak jalur non-linear secara kontinu juga terbukti berhasil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan memvalidasi sebuah sistem kendali formasi terdesentralisasi yang **adaptif dan kokoh** untuk kawanan quadcopter melalui serangkaian simulasi. Hasil utama menunjukkan bahwa strategi adaptif ERC secara signifikan **lebih unggul** dibandingkan strategi statis IAPF. Strategi ERC terbukti mampu memandu kawanan melewati celah sempit dengan **akurasi tinggi** ($RMS E_{total} = 0.692 m$) sebuah skenario di mana IAPF gagal total. Sistem juga menunjukkan **ketahanan yang luar biasa** terhadap gangguan angin eksternal, dengan menyelesaikan misi dalam durasi yang nyaris tidak terpengaruh sambil tetap menjaga **kekohesifan gerak yang tinggi** ($\bar{\phi} > 0.9$). Lebih lanjut, fungsionalitas yang dikembangkan untuk navigasi kompleks berhasil divalidasi, di mana sistem mampu memandu kawanan mengikuti lintasan **waypoint** dan **melingkar** secara presisi, dengan akurasi pelacakan mencapai ($RMS E_{total}$ hingga $0.193 m$). Meskipun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi batasan dari *planner* yang murni reaktif, yang terbukti saat sistem **gagal** mengatasi jebakan **topologis** (*U-Trap*).