



Autonomous Robotic Vehicles

Hellenic Mediterranean University

Lecture 5

Dr. Alina Eqtami

Μετά το σημερινό μάθημα θα μπορείτε:

- Να περιγράψετε τον φυσικό μηχανισμό κίνησης ενός quadcopter στον 3D space.
- Να κατανοείτε πώς οι τέσσερις κινητήρες συνδυάζονται για να παραχθούν δυνάμεις και ροπές στις κατευθύνσεις Roll, Pitch, Yaw και Thrust.
- Να εξηγείτε τη σχέση μεταξύ ώσης και προσανατολισμού για την επίτευξη οριζόντιας και κατακόρυφης κίνησης.
- Να αντιλαμβάνεστε την έννοια της **underactuation** και πώς αυτή επηρεάζει τον τρόπο ελέγχου.
- Να κατανοείτε τη **βασική εννοιολογική (conceptual) ανάλυση** του συστήματος πριν τη μοντελοποίηση.

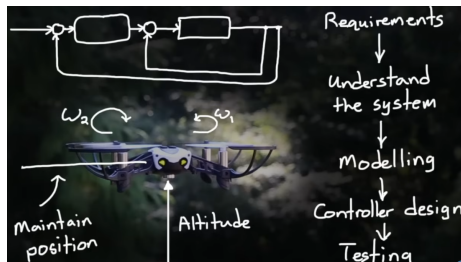
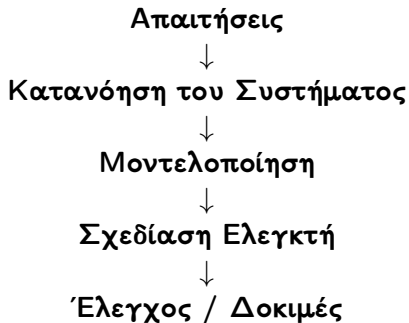
*This lecture serves as a brief introduction to UAV concepts.

For a more in-depth treatment, see *Drone Simulation and Control by MATLAB[®]*

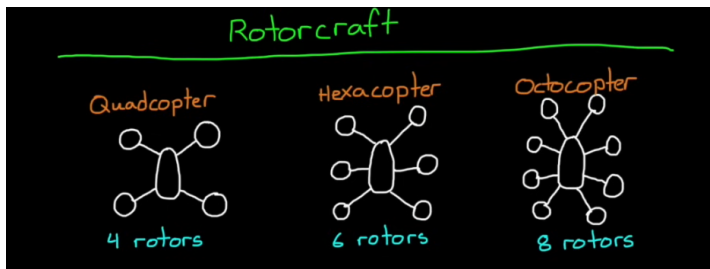
Έλεγχος Κίνησης

- Θα σχεδιάσουμε έναν controller για ένα mini drone.
- Στόχος: hover σε σταθερό ύψος- (fixed altitude).
- Θα σχεδιάσουμε και θα ελέγξουμε τον controller βήμα-βήμα.





Multirotor Types – Τύποι Πολυκοπτήρων



- **4, 6, 8 rotors:** Τυπικές διαμορφώσεις → πλήρης έλεγχος με σταθερό rotor.
- **2 rotors:** Ελικόπτερα (coaxial/tandem), απαιτούν μηχανισμούς ελέγχου γωνιών (swashplate).
- **3 rotors:** Υπάρχουν πειραματικά (Υ3), αλλά έχουν ασύμμετρο έλεγχο yaw.
- **Quadcopters:** Ελάχιστο πλήρως ελεγχόμενο σύστημα χωρίς κινητά μέρη.

- **Υπέρηχος (Ultrasound):** Δείχνει **απόσταση από το έδαφος**. Καλή ακρίβεια σε χαμηλά ύψη, περιορισμοί σε ύψος/ανωμαλίες εδάφους.
- **Κάμερα:** Δίνει οριζόντια κίνηση και ταχύτητα (optical flow). Καλή σε φωτεινό περιβάλλον, ευαίσθητη σε φωτισμό και υφή εδάφους.
- **Αισθητήρας Πίεσης:** Μετρά **ύψος** (altitude). Καλός για μεσαία/μεγάλα ύψη, θόρυβος σε μικρές διαφορές.
- **IMU:** Μετρά **επιταχύνσεις και γωνιακές ταχύτητες**. Πολύ υψηλή συχνότητα, αλλά συσσωρεύει σφάλματα (drift).



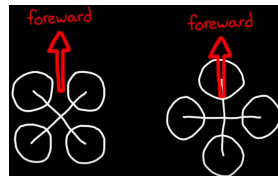
Ultrasound sensor.



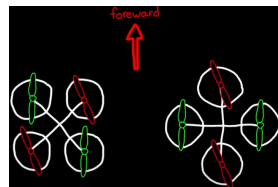
Camera sensor.

Actuators – Ενεργοποιητές

- Τα μοτέρ και οι έλικες είναι οι βασικοί ενεργοποιητές του συστήματος.
- Οι **κόκκινοι** και **πράσινοι** ρότορες περιστρέφονται **αντίθετα** (CW/CCW)** για να ακυρώνεται η ροπή yaw σε hover.
- Με διαφορεική μεταβολή στροφών:
 - **Roll**: δεξί–αριστερό ζεύγος
 - **Pitch**: εμπρός–πίσω ζεύγος
 - **Yaw**: CW ↔ CCW ζεύγη
- Έτσι επιτυγχάνεται **ανεξάρτητος έλεγχος** των RPY κινήσεων χωρίς μηχανικά swashplates.



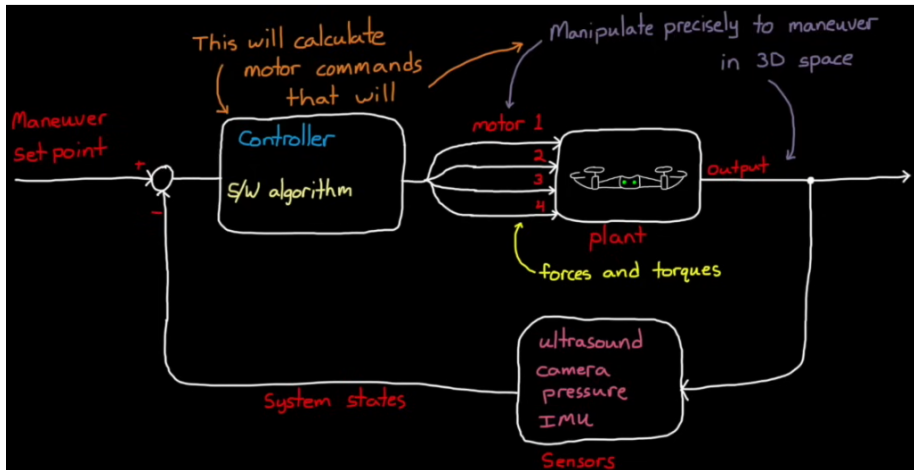
Top view. x and plus-configurations.



Top view. CW/CCW.

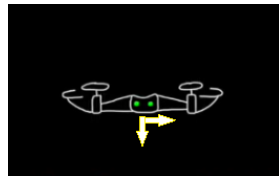
** CW/CCW: ClockWise / CounterClockWise

Overview of the Control Problem

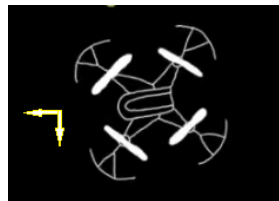


Underactuation – Υποενεργοποίηση

- Τα quadcopter είναι υποενεργοποιημένα συστήματα:
 - 6 βαθμοί ελευθερίας:
 - Άξονας των x (μπροστά-πίσω).
 - Άξονας των y (δεξιά-αριστερά).
 - Άξονας των z (πάνω-κάτω).
 - Roll, Pitch, Yaw
 - Μόνο 4 ενεργοποιητές.
- Δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος σε όλες τις μεταβλητές.
- Η οριζόντια κίνηση (x - y) επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω κλίσεων (roll-pitch) → σύζευξη δυναμικής.
- Αυτό κάνει τον έλεγχο πιο περίπλοκο και απαιτεί συνδυασμένες εντολές.



Front view. yz -axes.

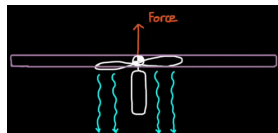


Top view. xy -axes.

Παραγωγή Άνωσης & Δύναμης

1. Παραγωγή Άνωσης (Lift Generation):

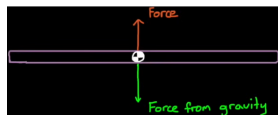
- Οι περιστρεφόμενοι έλικες ωθούν τον αέρα προς τα κάτω.
- Σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Newton, ασκείται αντίδραση προς τα πάνω.
- Αυτή η αντίδραση είναι η **thrust**, που ανυψώνει το drone.



Side view. Lift generation.

2. Δύναμη μέσω Κέντρου Μάζας (Force through CoG):

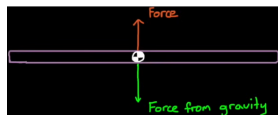
- Αν το thrust εφαρμόζεται μέσω του Center of Gravity (CoG), το drone ανεβαίνει χωρίς περιστροφή.
- Δεν δημιουργείται ροπή → έχουμε καθαρή μεταφορική κίνηση.



Side view. Force through CoG.

Hover Condition - Ισορροπία Δυνάμεων

- Όταν η **thrust** που παράγεται από τους έλικες είναι ίση με το βάρος του συστήματος, τότε η **συνισταμένη δύναμη είναι μηδενική**.
- Αν η δύναμη εφαρμόζεται μέσω του Κέντρου Μάζας (CoG), τότε δεν παράγεται ροπή και το όχημα δεν περιστρέφεται.
- Σε αυτήν την περίπτωση το drone, hovers σε σταθερό ύψος, χωρίς κατακόρυφη επιτάχυνση, χωρίς οριζόντια μετατόπιση και χωρίς roll-pitch-yaw κίνηση.
- Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε ισορροπία δυνάμεων και ροπών και αποτελεί τη βασική προϋπόθεση για τη σχεδίαση και ανάλυση ελεγκτών πτήσης → equilibrium point.

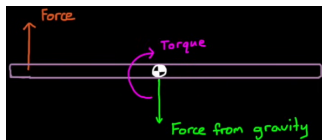


Side view. Force through CoG.

Δύναμη εκτός CoG και Ακύρωση Ροπής

1. Δύναμη εκτός CoG:

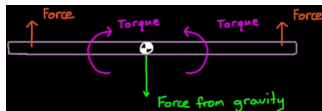
- Αν εφαρμόσουμε μία δύναμη μακριά από το CoG, το σύστημα δεν δέχεται μόνο μεταφορική κίνηση (translational motion), αλλά και ροπή (torque) γύρω από το CoG.
- Το αποτέλεσμα είναι ταυτόχρονη **επιτάχυνση και περιστροφή**.



Single off-CoG force \rightarrow translation + torque

2. Ακύρωση ροπής:

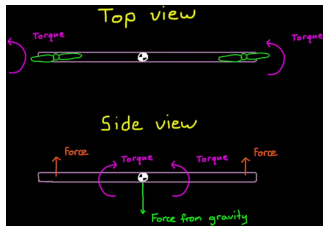
- Μια δεύτερη δύναμη συμμετρικά απέναντι από την πρώτη, ίση σε μέτρο, τότε **ακυρώνεται η ροπή**.
- Αν κάθε δύναμη είναι ίση με το μισό του βάρους, το σύνολο δημιουργεί καθαρή **ανύψωση χωρίς περιστροφή**.



Two opposite forces \rightarrow torque cancellation

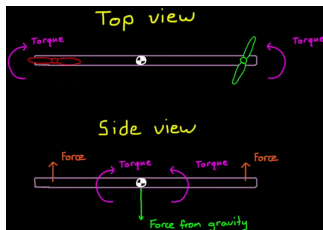
Κατευθύνσεις Έλικων και Ροπή Yaw

- Αν όλοι οι έλικες περιστρέφονται προς την **ίδια κατεύθυνση**, τότε δημιουργείται καθαρή ροπή γύρω από τον άξονα yaw (z).
- Στο plan view (επίπεδο xy), το drone θα αρχίσει να περιστρέφεται.



All rotors same direction \rightarrow net yaw torque

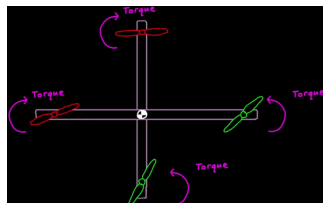
- Αν ρυθμίσουμε τους δύο έλικες να περιστρέφονται προς την αντίθετη κατεύθυνση από τους άλλους δύο, τότε οι ροπές αλληλοαναιρούνται.
- Το αποτέλεσμα είναι μηδενική καθαρή ροπή yaw και σταθερός προσανατολισμός.



Opposite rotor pairs \rightarrow torque cancellation

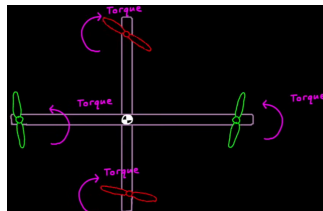
Quad Configuration

- Μια δοκός (bar) με δύο έλικες μπορεί να δημιουργήσει δυνάμεις και ροπές μόνο σε δύο διαστάσεις (roll-pitch), αλλά **όχι πλήρη έλεγχο yaw**-
No yaw authority.
- Για να επιτευχθεί πλήρης έλεγχος και **να μη περιστρέφεται το σύστημα**, προσθέτουμε μια ακόμη δοκό με δύο έλικες.
- Κάθε έλικας λειτουργεί με $1/4$ του βάρους για hover, και οι ζεύξεις CW-CCW ροπών ακυρώνουν τη συνολική ροπή yaw.
- Έτσι προκύπτει η τυπική διάταξη **quadrotor**, που επιτρέπει έλεγχο σε όλες τις κατευθύνσεις.



Quad configuration – same direction pairs

(red-red, green-green)



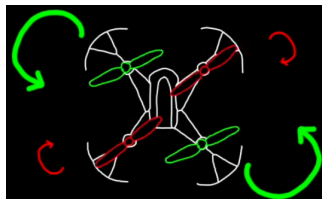
Quad configuration – alternating rotor

directions (red-green-red-green)



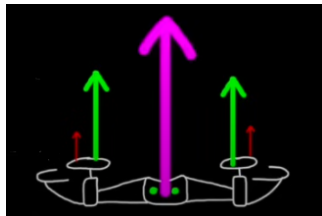
Έλεγχος Yaw με σταθερή συνολική ώση

- Για να προκαλέσουμε **yaw rotation**, **αυξάνουμε την ώση των δύο ελίκων που περιστρέφονται προς μία κατεύθυνση (π.χ. πράσινοι – CCW) και μειώνουμε την ώση των δύο άλλων (π.χ. κόκκινοι – CW) → Αυτό δημιουργεί καθαρή ροπή yaw.**
- Ταυτόχρονα, η **συνολική ώση παραμένει ίση με το βάρος**, άρα το drone **δεν ανεβαίνει ή κατεβαίνει.**
- Έτσι το **yaw control αποσυζεύγεται από τον κατακόρυφο έλεγχο ώσης.**



Plan view – two larger, two smaller torques

→ net yaw

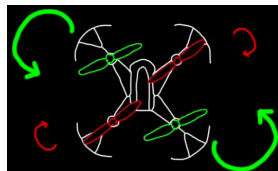


Side view – total thrust remains equal to

weight

Αποσύζευξη Yaw από Roll–Pitch

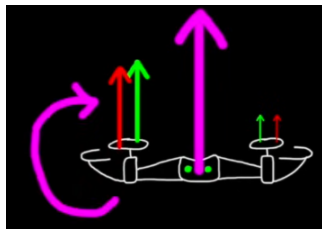
- Στην εναλλάξ διάταξη, το yaw ελέγχεται αυξομειώνοντας την ώση σε αντιδιαμετρικούς έλικες.
- Όταν αυξάνουμε δύο έλικες και μειώνουμε τους αντιδιαμετρικούς, οι ροπές roll και pitch ακυρώνονται, ενώ παράγεται καθαρή ροπή yaw.
- Έτσι το yaw control είναι αποσυζευγμένο από τον έλεγχο roll και pitch.



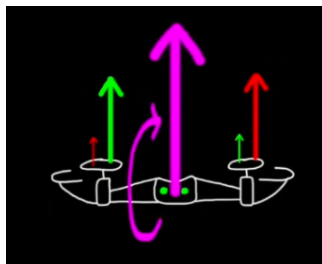
Plan view – opposite rotor pairs $\uparrow\downarrow \rightarrow$
pure yaw torque

Έλεγχος Roll και Pitch

- Για να δημιουργήσουμε **roll or pitch**, αυξάνουμε την ώση σε ένα ζεύγος ελίκων και μειώνουμε στο αντιδιαμετρικό ζεύγος.
- Αν αυξήσουμε το **δεξί ζεύγος** και μειώσουμε το **αριστερό** → έχουμε **roll**.
- Αν αυξήσουμε το **μπροστινό ζεύγος** και μειώσουμε το **πίσω** → έχουμε **pitch**.
- Η **συνολική ώση παραμένει ίδια**, άρα δεν αλλάζει το ύψος — μόνο η κλίση.



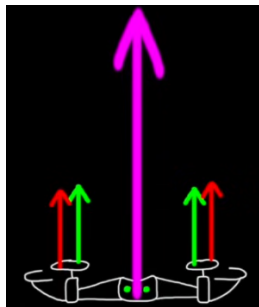
Roll – increase right pair, decrease left pair



Pitch – increase front pair, decrease rear pair

Κατακόρυφη Κίνηση και Σύνοψη Ελέγχου

- Για να κινηθεί το drone προς τα πάνω ή κάτω, αυξάνουμε ή μειώνουμε ομοιόμορφα την ώση όλων των ελίκων.
- Αύξηση όλων των ελίκων → άνοδος.
Μείωση όλων → κάθοδος.
- Η κίνηση αυτή δεν προκαλεί roll, pitch ή yaw — είναι καθαρά κατακόρυφη.



All rotors increase/decrease → vertical motion.

Σύνοψη Ελέγχου

Τα **Roll**, **Pitch**, **Yaw** και **Thrust** είναι οι τέσσερις κατευθύνσεις στις οποίες έχουμε άμεσο έλεγχο. Οι εντολές προς το σύστημα θα είναι συνδυασμός αυτών των τεσσάρων εισόδων.

Motor Mixing Algorithm

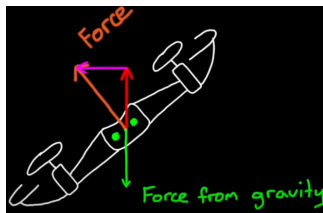
- Οι εντολές **Roll**, **Pitch**, **Yaw** και **Thrust** **συνδυάζονται (mixing)** για να υπολογιστεί η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής σε κάθε κινητήρα.
- Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο **flight controller** και επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο όλων των αξόνων.

Motor Mixing Algorithm

$$\begin{aligned} \text{Motor}_{\text{front right}} &= \text{Thrust}_{\text{cmd}} + \text{Yaw}_{\text{cmd}} + \text{Pitch}_{\text{cmd}} + \text{Roll}_{\text{cmd}} \\ \text{Motor}_{\text{front left}} &= \text{Thrust}_{\text{cmd}} - \text{Yaw}_{\text{cmd}} + \text{Pitch}_{\text{cmd}} - \text{Roll}_{\text{cmd}} \\ \text{Motor}_{\text{back right}} &= \text{Thrust}_{\text{cmd}} - \text{Yaw}_{\text{cmd}} - \text{Pitch}_{\text{cmd}} + \text{Roll}_{\text{cmd}} \\ \text{Motor}_{\text{back left}} &= \text{Thrust}_{\text{cmd}} + \text{Yaw}_{\text{cmd}} - \text{Pitch}_{\text{cmd}} - \text{Roll}_{\text{cmd}} \end{aligned}$$

Οριζόντιες Κινήσεις και Underactuation

- Η μετακίνηση μπροστά–πίσω και δεξιά–αριστερά δεν γίνεται με άμεση οριζόντια ώση, αλλά μέσω κλίσης (Roll–Pitch) του drone.
- Όταν το drone γείρει προς μία κατεύθυνση, το κάθετο διάνυσμα ώσης αποκτά οριζόντια συνιστώσα, που προκαλεί επιτάχυνση προς αυτή την κατεύθυνση.



Tilted thrust vector creates horizontal motion

Οριζόντια κίνηση μέσω κλίσης

Οι κινήσεις αυτές είναι **underactuated** — δεν έχουμε ανεξάρτητους ενεργοποιητές για οριζόντια ώση, αλλά τις επιτυγχάνουμε μέσω της στάσης (attitude).

Συνοψίζοντας...

Επόμενο βήμα: Μοντελοποίηση και Έλεγχος

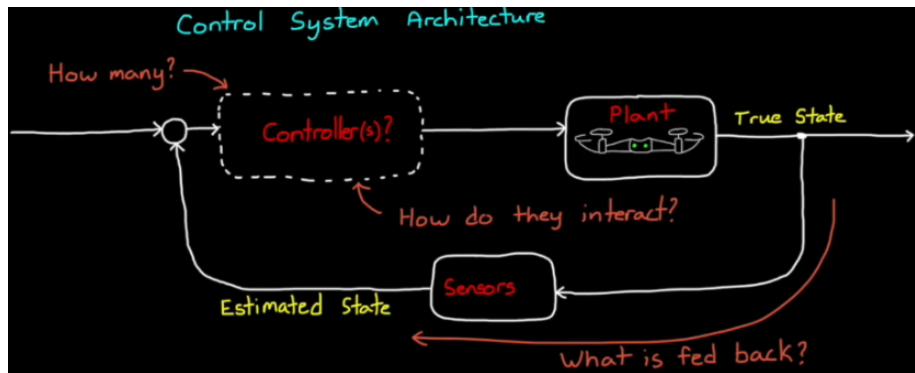
Τελειώσαμε με το **Conceptual/Physical SetUp**...

Σύνοψη

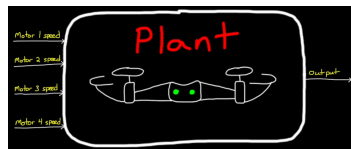
- Με κατάλληλο **συνδυασμό ενεργειών στους τέσσερις κινητήρες**, ελέγχουμε **Roll, Pitch, Yaw και Thrust**.
- Έτσι, το **quadcopter** μπορεί να κινηθεί και να προσανατολιστεί ελεύθερα στον 3D space.
- Αυτή η ανάλυση περιγράφει τον **μηχανισμό παραγωγής δυνάμεων και ροπών**

Το επόμενο βήμα είναι η **μοντελοποίηση της δυναμικής και ο σχεδιασμός ελέγχου**.

Δομή Συστήματος Ελέγχου – Block Diagram



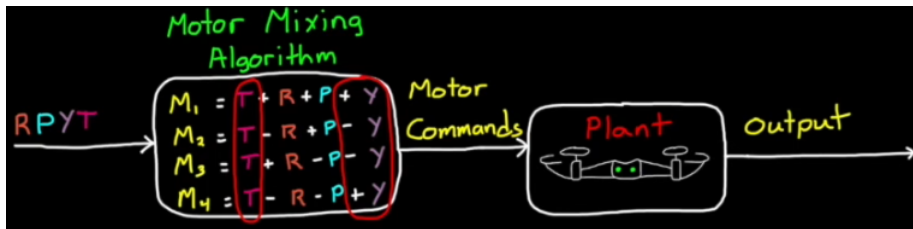
- Το **Plant** είναι το **mini drone**.
- **Είσοδοι:** Οι ταχύτητες περιστροφής των κινητήρων → οι έλικες περιστρέφονται και παράγουν **δυνάμεις και ροπές**.
- Οι δυνάμεις και οι ροπές αυτές **επηρεάζουν την κατάσταση** του συστήματος (state).
- **Έξοδος:** Θέλουμε το mini drone να κάνει **hover σε σταθερό ύψος** (fixed altitude).



Mini drone – Input: motor speeds, Output: altitude

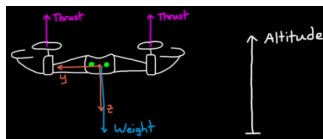
Άμεσες Εντολές μέσω Motor Mixing Algorithm

- Κρατάμε το **Motor Mixing Algorithm** και δίνουμε εντολές απευθείας σε **Roll, Pitch, Yaw** και **Thrust**.
- Η εντολή **Thrust** είναι πάντα προς την ίδια κατεύθυνση σε σχέση με το σώμα του drone — **κατά τον άξονα z του οχήματος**.
- Αν το drone πετά επίπεδα (level flight) και αυξήσουμε την Thrust, **αυξάνεται ο ρυθμός ανόδου** (altitude rate).

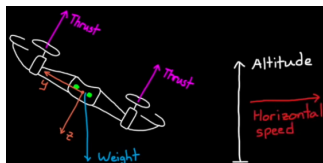


Κατεύθυνση Ώσης και Μικρές Γωνίες Κλίσης

- Η εντολή **Thrust** είναι πάντα προς την ίδια κατεύθυνση σε σχέση με το σώμα του drone — **κατά τον άξονα z του οχήματος**.
- Αν είχαμε ένα racing drone, είναι πιθανό να πετούσε σε **πολύ μεγάλες γωνίες roll-pitch**, οπότε θα υπήρχε **σύζευξη μεταξύ του ρυθμού ανόδου (altitude rate) και της οριζόντιας ταχύτητας**.



Thrust along body z-axis.



Racing drone with large roll-pitch angles.

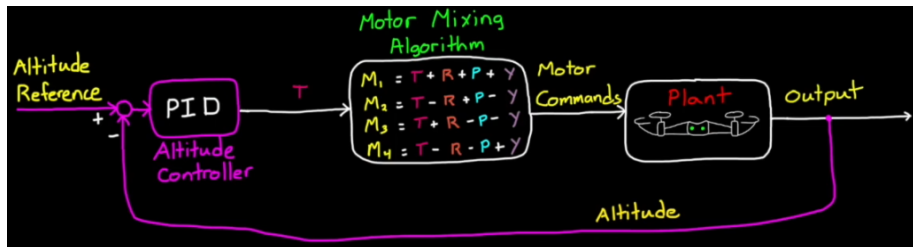
Assumption – Υπόθεση

Για **hover controller**:

Οι γωνίες roll-pitch θεωρούνται **μικρές**, έτσι η ώση επηρεάζει **μόνο τον ρυθμό ανόδου** και όχι την οριζόντια ταχύτητα.

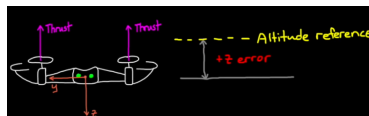
Altitude Control

- Χρησιμοποιούμε το **thrust** για να **ρυθμίσουμε το ύψος** του drone.
- Μετράμε το **πραγματικό ύψος** και το **συγκρίνουμε με την επιθυμητή αναφορά** (reference altitude).
- Το **σφάλμα ύψους** οδηγείται σε έναν **ελεγκτή ύψους** (e.g. PID controller), ο οποίος **αυξάνει ή μειώνει την ώση** ώστε να διατηρείται το επιθυμητό ύψος.
- Η έξοδος του ελεγκτή τροποποιεί την εντολή thrust, η οποία εφαρμόζεται μέσω του motor mixing algorithm.



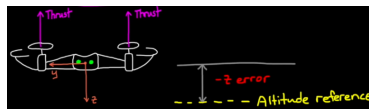
Altitude Error Response

- Αν το drone πετά χαμηλότερα από το επιθυμητό ύψος, το σφάλμα είναι θετικό και η εντολή thrust αυξάνεται — και οι τέσσερις κινητήρες επιταχύνουν.



Too low → increase thrust (motors speed up).

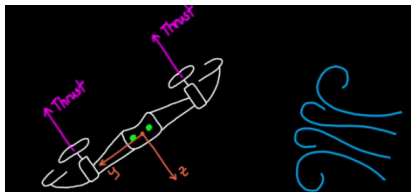
- Αν το drone πετά υψηλότερα από το επιθυμητό ύψος, το σφάλμα είναι αρνητικό και η εντολή thrust μειώνεται — και οι τέσσερις κινητήρες επιβραδύνουν.



Too high → decrease thrust (motors slow down).

Limitations of Altitude Control

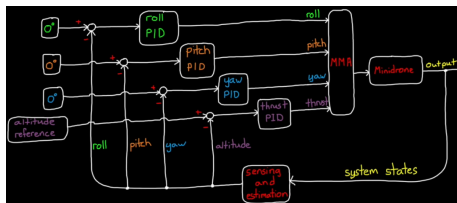
- Ωραία όλα αυτά, αλλά στην πράξη μπορεί να υπάρχουν **διαταραχές** όπως **ριπές ανέμου** (wind gusts) ή άλλες εξωτερικές επιδράσεις.
- Αυτές μπορούν να προκαλέσουν **roll-pitch κινήσεις**, με αποτέλεσμα η ώση να μην δρα πλέον μόνο κατακόρυφα.
- Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ώση δημιουργεί και **οριζόντια συνιστώσα**, οδηγώντας σε **μη επιθυμητή μετατόπιση**.
- Ο altitude controller συνεχίζει να λειτουργεί, αλλά **δεν αρκεί από μόνος του** — δεν έχει αξία αν τρέχουμε να πιάσουμε το drone!



Wind gusts can induce roll-pitch and horizontal drift.

Attitude Control

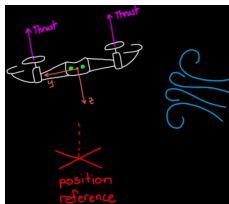
- Θυμηθείτε: Μπορούμε να ελέγχουμε ανεξάρτητα τα **Roll**, **Pitch**, **Yaw** και το **Thrust**.
- Εισάγουμε έναν **Attitude Controller** για να ελέγχουμε τις γωνίες Roll, Pitch, Yaw.
- Χρησιμοποιούμε **PID controllers** σε κάθε άξονα ώστε το drone να διατηρεί μηδενικές γωνίες — επίπεδη πτήση.
- Με αυτόν τον τρόπο, η ώση δρα και πάλι **μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση**, ρυθμίζοντας το ύψος ανεξάρτητα από την κλίση.



Attitude controller (PID on RPY) + altitude controller block diagram

Limitations of Attitude Control –1

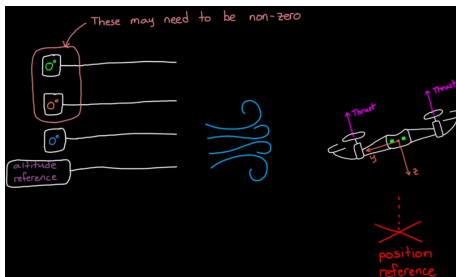
- Όταν υπάρχει μια ριπή ανέμου, ο **Attitude Controller** θα διορθώσει τις γωνίες ώστε το drone να επανέλθει σε επίπεδη στάση.
- Ωστόσο, για ένα μικρό χρονικό διάστημα το όχημα θα έχει μετακινηθεί οριζόντια.
- Με κάθε διαταραχή, όσο μικρή κι αν είναι, το drone θα μετατοπίζεται σταδιακά — δεν υπάρχει μηχανισμός να το επαναφέρει στη θέση αναφοράς.
- Ο έλεγχος στάσης διατηρεί τον προσανατολισμό, όχι τη θέση.



Wind gust disturbance → temporary tilt → horizontal drift

Limitations of Attitude Control –2

- Σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. ριπές ανέμου), το drone μπορεί να χρειάζεται **μη μηδενικές γωνίες roll-pitch**.
- Ένα σταθερό pitch/roll σε κάποια τιμή επιτρέπει την αντιστάθμιση των εξωτερικών δυνάμεων και τη διατήρηση θέσης.
- Άρα, ο έλεγχος στάσης δεν στοχεύει πάντα στο **μηδέν**, αλλά σε **κατάλληλη γωνία αναφοράς**.

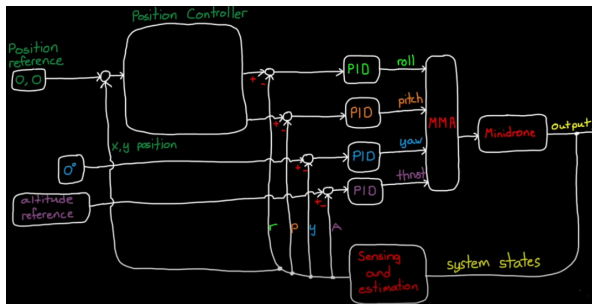


Non-zero roll-pitch setpoints compensate wind gusts

- Δεν μπορούμε να καθορίζουμε χειροκίνητα τις **γωνίες roll–pitch** που απαιτούνται για να διατηρήσουμε **σταθερή θέση** στο έδαφος. **Χρειαζόμαστε έναν ελεγκτή θέσης** που να **αναγνωρίζει πότε το drone απομακρύνεται** και να υπολογίζει τις κατάλληλες διορθώσεις ώστε να το φέρει πίσω στο σημείο αναφοράς.
- Παρόλο που δεν καθορίζουμε εμείς τις γωνίες roll–pitch, θυμηθείτε ότι η **οριζόντια μετακίνηση** (μπροστά–πίσω, δεξιά–αριστερά) **επιτυγχάνεται μέσω κλίσης**. Άρα, το σύστημα ελέγχου **θα συζεύξει τα σφάλματα θέσης με γωνίες roll–pitch** για να επιτύχει τις επιθυμητές μετακινήσεις.

Position Control –2

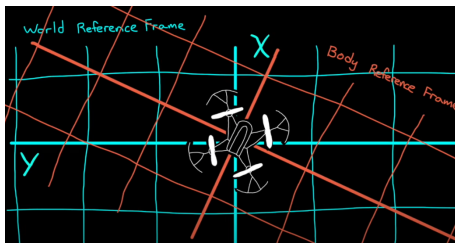
- Το σημείο αναφοράς θέσης είναι το $(0,0)$ — ακριβώς πάνω από το σημείο απογείωσης.
- Ο ελεγκτής θέσης υπολογίζει γωνίες roll–pitch με βάση το σφάλμα θέσης και τις προωθεί στον attitude controller.
- Ο έλεγχος ύψους παραμένει ανεξάρτητος μέσω της εντολής thrust.



Position controller outputs roll–pitch references to attitude controller

Χρήση της Γωνίας Yaw στον Έλεγχο Θέσης

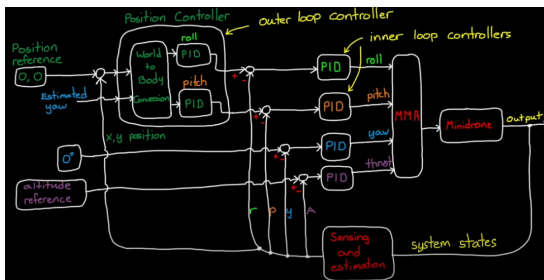
- Η μετρούμενη γωνία Yaw τροφοδοτείται επίσης στον ελεγκτή θέσης.
- Ο λόγος είναι ότι το σφάλμα θέσης στον άξονα x - y εκφράζεται στο σύστημα αναφοράς του εδάφους (world frame), ενώ οι εντολές Roll-Pitch είναι σε συντεταγμένες του σώματος (body frame).
- Επομένως, όταν το drone έχει περιστραφεί γύρω από τον άξονα Yaw, η μετατροπή των σφαλμάτων θέσης από το world στο body frame είναι απαραίτητη.



Yaw is used to transform world-frame XY errors into body-frame commands

Συνδυασμός Ελεγκτών – Τελική Δομή

- Ο έλεγχος του συστήματος υλοποιείται με **PID ελεγκτές σε διαδοχική (cascaded) διάταξη**.
- Οι εξωτερικοί ελεγκτές θέσης παράγουν αναφορές γωνιών **Roll–Pitch**.
- Οι εσωτερικοί ελεγκτές στάσης σταθεροποιούν τις γωνίες Roll, Pitch, Yaw, ενώ ο έλεγχος Thrust ρυθμίζει το ύψος.
- Η διάταξη αυτή **αποσυσζεύγει** τις κινήσεις και εξασφαλίζει **σταθερό και ακριβή έλεγχο**.



- Εξετάσαμε πώς το quadcopter **παράγει δυνάμεις και ροπές** μέσω των τεσσάρων κινητήρων.
- Αναλύσαμε τη **σχέση μεταξύ Thrust και Attitude** και πώς μπορούμε να ελέγχουμε **Roll–Pitch–Yaw** και Thrust.
- Είδαμε πώς οι **ελεγκτές ύψους, στάσης και θέσης** συνεργάζονται σε **διαδοχική (cascaded) αρχιτεκτονική**.
- Τόνισαμε τους **περιορισμούς** κάθε επιπέδου ελέγχου και την ανάγκη για **συνδυασμό πληροφοριών** (π.χ. Yaw για μετασχηματισμό συντεταγμένων).

Επόμενο βήμα:

Μοντελοποίηση δυναμικής και σχεδίαση ελεγκτών.

Ερωτήσεις;!