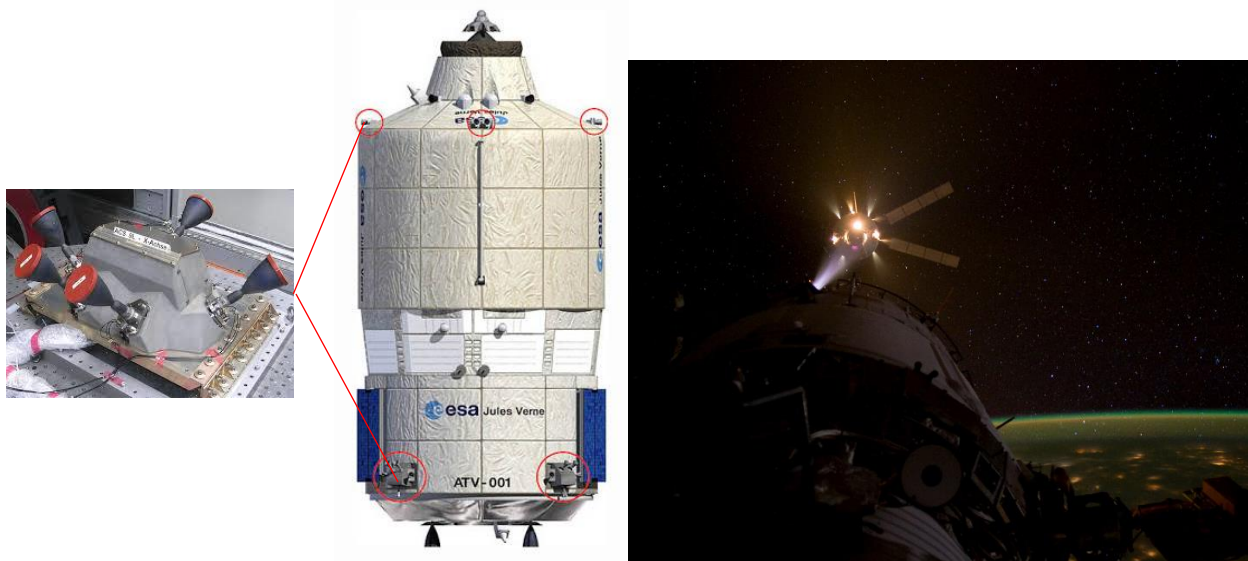


Κεφάλαιο 6: Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS)

Σε κάθε ένα διαστημικό σκάφος, υπάρχει ένα υποσύστημα που "κατευθύνει" το όχημα ελέγχοντας τον προσανατολισμό του και την τροχιά του. Ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να έχει το σωστό προσανατολισμό ώστε τα επιστημονικά του όργανα - οι κάμερες και οι κεραιές - να ευθυγραμμίζονται με συγκεκριμένα σημεία στη Γη. Για τον έλεγχο προσανατολισμού, οι πύραυλοι ή άλλες συσκευές περιστρέφονται γύρω από το κέντρο μάζας τους. Επίσης, ένα διαστημικό σκάφος πρέπει να είναι σε θέση να φτάσει και να διατηρήσει την τροχιά της αποστολής. Όπως έχουμε δει, για τον τροχιακό έλεγχο χρησιμοποιεί εξειδικευμένους προωθητές/πυραυλοκινητήρες κινητήρες που εκτελούν τους ελιγμούς.



Σχήμα 1: Το Διαστημικό σκάφος του EOA ATV με τους προωθητές/κινητήρες του. Εικόνα από την διαδικασία προσέγγισης/ελιγμών του ATV στον ISS για την πρόσδεσή του. Το Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού (ΥΠΕΠ) κατευθύνει το διαστημικό σκάφος, ελέγχοντας την τροχιά (ύψος), προσανατολισμό (γωνία περιστροφής) χρησιμοποιώντας αισθητήρες/ενεργοποιητές

Το υποσύστημα που ελέγχει τον προσανατολισμό και την τροχιά του διαστημικού σκάφους, φυσικά ονομάζεται υποσύστημα ελέγχου θέσης, τροχιάς και προσανατολισμού (attitude and orbit control subsystem-AOCS). Αποκομίζουμε τις προδιαγραφές (ακρίβεια γωνίας κατεύθυνσης, ευστάθεια), για το AOCS από το ωφέλιμο φορτίο (π.χ. οπτικός αισθητήρας) και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του συστήματος. Μπορούμε να χωρίσουμε το συνολικό προϋπολογισμό παραμέτρων του υποσυστήματος σε προϋπολογισμό ελέγχου προσανατολισμού και σε προϋπολογισμό ελέγχου τροχιάς. Ο προϋπολογισμός ελέγχου προσανατολισμού είναι η συνολική γωνιακή ορμή που μπορεί να χρησιμοποιήσει το διαστημικό σκάφος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ο προϋπολογισμός ελέγχου τροχιάς είναι η συνολική μεταβολή ΔV που απαιτείται για την επίτευξη και τη διατήρηση της τροχιάς της αποστολής. Εκτός από το αριθμητικό εύρος στους προϋπολογισμούς απόδοσης, οι σχεδιαστές ενός υποσυστήματος AOCS πρέπει να γνωρίζουν πως το διαστημικό σκάφος θα καθορίσει τον

προσανατολισμό του και την τροχιά του και ποιοι μηχανισμοί θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο αυτών. Στην συνέχεια, θα περιγράψουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πως τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν αισθητήρες, πυραύλους και άλλα εργαλεία για να στρέψουν ένα διαστημικό σκάφος προς τη σωστή κατεύθυνση και να το θέσουν στη σωστή τροχιά.

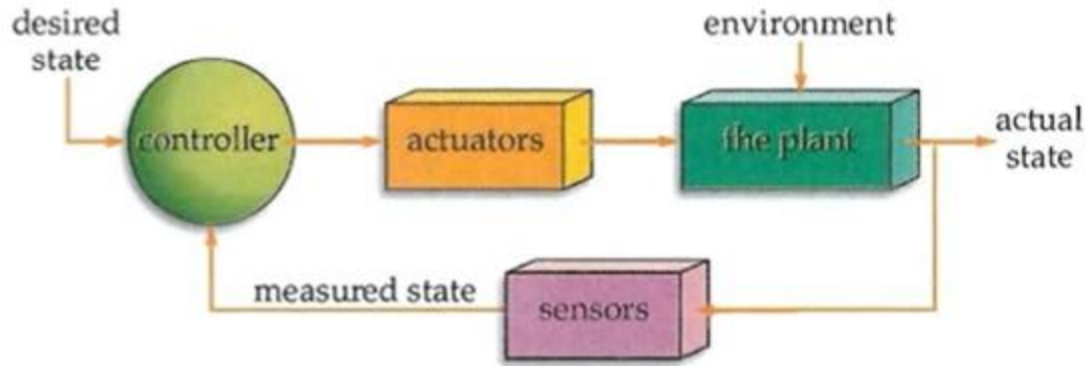
Σε αυτή την ενότητα θα μάθετε να:

- Εξηγείτε και να εφαρμόζετε σημαντικές έννοιες της δυναμικής σε ένα πρόβλημα ελέγχου ενός διαστημικού οχήματος.
- Περιγράψετε τα βασικά στοιχεία και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα υποσυστήματα ελέγχου θέσης και να τα εξηγήσετε εύκολα σε σχηματικά διαγράμματα.

Θα αρχίσουμε τη συζήτησή μας για το υποσύστημα ελέγχου θέσης και προσανατολισμού (AOCS) εστιάζοντας στο τμήμα του προσανατολισμού. Για παράδειγμα, αν θέλουμε ένα διαστημικό σκάφος να τραβήξει φωτογραφίες ένα συγκεκριμένο σημείο στη Γη, πρέπει να ευθυγραμμίσουμε το ωφέλιμο φορτίο, ώστε να δείχνει στο σημείο αυτό. Θα πρέπει να ελέγξουμε τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους ώστε να δείχνει προς τη Γη. Το "προς τη Γη" είναι η κατεύθυνση του ναδίρ σε διαστημικούς όρους. Η αντίθετη κατεύθυνση, μακριά από τη Γη προς το διάστημα, είναι η κατεύθυνση του ζενίθ. Ομοίως, τα οχήματα εκτόξευσης πρέπει να ελέγχουν τον προσανατολισμό τους για να μεταφερθούν στη σωστή τροχιά και να διατηρήσουν τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά κατά μήκος του μακριού άξονα στον οποίο αντέχουν μεγαλύτερες καταπονήσεις.

Επειδή η λειτουργία του προσανατολισμού είναι τόσο σημαντική δίνεται ένα ξεχωριστό όνομα - υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού (ADCS). Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε σε αυτό το υποσύστημα με αυτό το όνομα. Ανεξάρτητα από το όνομα που δίνεται στο υποσύστημα, η δουλειά του είναι να ρυθμίζει τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους ώστε να δείχνει προς τη σωστή κατεύθυνση.

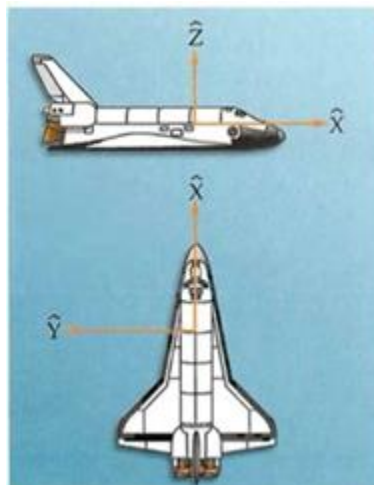
Ξέρουμε ότι όλα τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου έχουν τα ίδια βασικά συστατικά και λειτουργίες. Σε αυτή την ενότητα, η "επιθυμητή κατάσταση" είναι η συγκεκριμένος προσανατολισμός που πρέπει να έχει ένα όχημα. Ξεκινάμε καθορίζοντας αυτό τον προσανατολισμό. Στη συνέχεια, εξετάζουμε τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος για να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές που διέπουν τη γωνιακή του ορμή. Επίσης βλέπουμε πώς διάφορα φαινόμενα στο διαστημικό περιβάλλον επηρεάζουν τον προσανατολισμό του. Μετά από αυτή την εισαγωγή, θα στρέψουμε την προσοχή μας στους αισθητήρες και τα όργανα που χρησιμοποιούμε για να μάθουμε και να καθορίσουμε τον προσανατολισμό του διαστημικού σκάφους στο διάστημα. Πριν κοιτάξουμε τους ελεγκτές προσανατολισμού, θα εξετάσουμε πρώτα τους τύπους ενεργοποιητών θέσης που είναι διαθέσιμοι για τους σχεδιαστές. Έχοντας αυτά υπόψη, θα εξετάσουμε τελικά έναν ελεγκτή προσανατολισμού και θα δούμε πως όλα μαζί συνδυάζονται (Σχήμα 2).



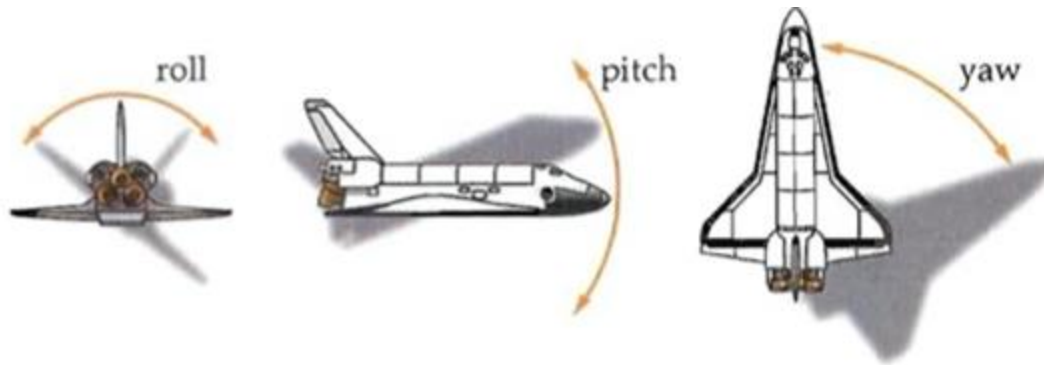
Σχήμα 2 Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, κύρια στοιχεία: Feedback - ανάδραση, ελεγκτής ή κατευθυντής (controller), επενεργητής ή ενεργοποιητής (actuator), plant = σύστημα, διαταραχή (disturbance), μέτρηση (measured state), επιθυμητή κατάσταση ή μεταβλητή (desired state), σφάλμα (error), ελεγχόμενη μεταβλητή/έξοδος (actual state)

Σωστός προσανατολισμός

Υπενθυμίζουμε ότι για να περιγράψουμε την κίνηση ενός αντικείμενου χρειαζόμαστε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Για να περιγράψουμε τον προσανατολισμό όμως ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τις περιστροφές από ότι για την μεταφορική κίνηση. Γι' αυτόν τον λόγο, ορίζουμε τον προσανατολισμό όσον αφορά γωνίες. Ο προσανατολισμός περιγράφεται ως η γωνιακή περιστροφή σε σχέση με ένα σύστημα συντεταγμένων με κέντρο το σώμα, που ονομάζεται σύστημα αναφοράς σώματος, όπου το X δείχνει τη μύτη, το Y το αριστερό πτερό και το Z την οροφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Οι γωνίες περιστροφής γύρω από τους άξονες X, Y, Z ονομάζονται αντίστοιχα roll (κλίση), pitch (πρόνευση) και yaw (εκτροπή), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



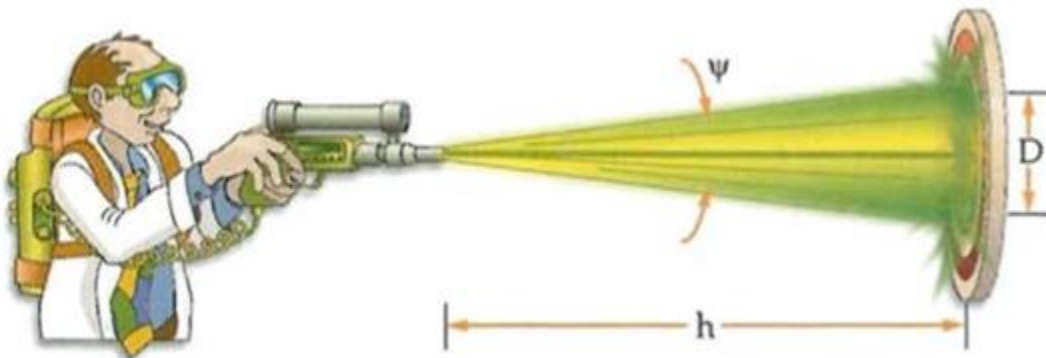
Σχήμα 3 σύστημα αναφοράς σώματος/ Σωματόδετοι άξονες



Σχήμα 4: Γωνίες Euler ή περιστροφής ενός διαστημικού σκάφους, που περιγράφουν την κατεύθυνση/κατάσταση του σκάφους roll (κλίση), pitch (πρόνευση) και yaw (εκτροπή)

Προφανώς, ένα διαστημικό σκάφος σε σχήμα ορθογωνίου δεν έχει μύτη ή φτερά. Αντ' αυτού, οι σχεδιαστές καθορίζουν τις προτιμώμενες κατευθύνσεις μέσω του κέντρου μάζας σε ένα σύστημα με κέντρο το σώμα και στη συνέχεια καθορίζουν τις γωνίες roll, pitch και yaw σε σχέση με αυτό.

Τώρα που δείξαμε πως περιγράφεται ο προσανατολισμός ενός διαστημικού σκάφους, πως θα διαπιστώσουμε εάν αυτό έχει το σωστό προσανατολισμό; Συνήθως, περιγράφουμε τις απαιτήσεις ελέγχου προσανατολισμού όσον αφορά την ακρίβεια και το ρυθμό μεταβολής του. Για να καταλάβουμε τι εννοούμε με τον προσανατολισμό ή την ακρίβεια, υποθέστε ότι προσπαθούμε να «ρίξουμε» μια ακτίνα λέιζερ σε έναν στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12-9.



Σχήμα 5: Ακρίβεια θέσης/κατεύθυνσης (attitude accuracy/pointing)

Η ικανότητά μας να κρατήσουμε τη δέσμη στο στόχο εξαρτάται από το μέγεθος του στόχου και την σταθερότητα του χεριού μας. Όσο μικρότερος είναι ο στόχος, τόσο πιο σταθερό θα πρέπει να είναι το χέρι μας για να διατηρήσουμε το λέιζερ στο στόχο. Ας ελπίσουμε ότι, ακόμη και όταν το χέρι μας τρέμει, η δέσμη θα τείνει να παραμείνει μέσα σε έναν κώνο κοντά στο στόχο. Το γωνιακό μέγεθος αυτού του κώνου καθορίζει την ακρίβεια, ψ . Για ένα διαστημικό σκάφος που προσπαθεί να στρέψει μια κεραία σε ένα σταθμό εδάφους στη Γη, για παράδειγμα, το σύστημα ελέγχου πρέπει να είναι αρκετά ακριβές ώστε να κρατά τη ραδιοσυχνότητα εστιασμένη πάνω στην κεραία του δέκτη. Ας υποθέσουμε ότι προσπαθούμε να διατηρήσουμε τη δέσμη του λέιζερ επικεντρωμένη σε έναν στόχο περίπου στο μέγεθος ενός πιάτου διαμέτρου 25, όπως φαίνεται

στο σχήμα 5. Γνωρίζουμε την ακρίβεια, ψ και την απόσταση από τον στόχο, h . Για να βρούμε τη διάμετρο του στόχου, D , που μπορούμε να «χτυπήσουμε», χρησιμοποιούμε:

$$D = h\psi$$

Όπου

D : διάμετρος στόχου που μπορούμε να «χτυπήσουμε» (m)

h : απόσταση από στόχο (m)

ψ : ακρίβεια (rad)

Ο Πίνακας 12-1 δείχνει την απαιτούμενη ακρίβεια για να παραμείνει η δέσμη εστιασμένη στο πιάτο για διάφορες αποστάσεις. Αντίστοιχα, ένα διαστημικό σκάφος τηλεπισκόπησης που διέρχεται από πάνω μας σε υψόμετρο 500 χιλιομέτρων θα χρειαζόταν ακρίβεια περίπου $0,003^\circ$ για να στρέψει μια δέσμη λέιζερ απευθείας σε ένα σπίτι ($D = 26\text{m}$). Ο έλεγχος μιας ακτίνας λέιζερ είναι ένα δύσκολο σενάριο επειδή η δέσμη έχει μια πολύ στενή ακτίνα εκπομπής. Οι αποστολές τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιούν οπτικές ή υπέρυθρες κάμερες έχουν συνήθως φακούς με οπτικά πεδία αρκετών μοιρών, ανάλογα βέβαια με την εφαρμογή. Για την ευρύτερη δυνατή κάλυψη, οι αποστολές επικοινωνίας συχνά σχεδιάζουν κεραιές με πολύ ευρεία οπτική γωνία. Οι απαιτήσεις για τον προσανατολισμό διαστημικών σκαφών, επομένως, εξαρτάται από το θέμα, το οπτικό πεδίο του αισθητήρα και άλλους παράγοντες, όπως το χρόνο και οι γωνία θέασης.

Για να στοχεύσουμε ένα πιάτο με διάμετρο 25 cm	Ακρίβεια Κατεύθυνσης
1.4m	10°
14m	1°
140m	0.1°
1400m	0.01°

Πίνακας 1: Ακρίβεια κατεύθυνσης

Ο ρυθμός αλλαγής του προσανατολισμού είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη κατά τον καθορισμό των απαιτήσεων ελέγχου. Για παράδειγμα, ένα διαστημικό σκάφος τηλεπισκόπησης μπορεί να χρειαστεί να μετατοπίσει έναν αισθητήρα του μεταξύ διαφόρων στόχων στο έδαφος. Ο ρυθμός περιστροφής είναι η γωνιακή ταχύτητα που πόσο γρήγορα ένα διαστημικό σκάφος μπορεί να αλλάξει τον προσανατολισμό του.

Τώρα που καταλαβαίνουμε περισσότερα για τον προσανατολισμό, ας αρχίσουμε να βλέπουμε τη δυναμική συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος. Θα στρέψουμε την προσοχή μας στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τον προσανατολισμό ενός διαστημικού σκάφους.

Δυναμική συμπεριφορά

Όπως γνωρίζουμε, όλα τα περιστρεφόμενα αντικείμενα ακολουθούν τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Μια περιστρεφόμενη μάζα έχει γωνιακή ορμή, η οποία είναι συνάρτηση του

σχήματος, της κατανομής της μάζας καθώς και του ρυθμού περιστροφής της. Για παράδειγμα, ένα συμπαγές αντικείμενο με όλη τη μάζα του συγκεντρωμένη κοντά στο κέντρο του περιστρέφεται πολύ πιο εύκολα από ένα αντικείμενο στο οποίο η μάζα του βρίσκεται μακριά από το κέντρο του.



Σχήμα 6: Μεταβολή Μάζας/Ροπής Αδράνειας: Οι αθλητές του πατινάζ αλλάζουν την ροπή αδράνειας με κινήσεις των χεριών τους για να ελέγξουν τον ρυθμό περιστροφής τους. Διατηρώντας σταθερή την συνολική στροφορμή, θα περιστραφούν πιο γρήγορα φέρνοντας τα χέρια προς τα μέσα (χαμηλότερη ροπή αδράνειας) και πιο αργά με τα χέρια σε έκταση (ψηλότερη στροφορμή).

Όπως δείχνει το Σχήμα 6, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αθλητές του πατινάζ φέρνουν τα χέρια τους κοντά στο σώμα για να γυρίσουν πιο γρήγορα και ανοίγουν τα χέρια τους για να επιβραδύνουν. Η κατανομή της μάζας περιγράφει τη ροπή αδράνειας του αντικειμένου, I . Γνωρίζοντας τη ροπή αδράνειας, και τη γωνιακή ταχύτητα του αντικειμένου $\vec{\Omega}$, μπορούμε να βρούμε τη γωνιακή ορμή του, \vec{H} :

$$\vec{H} = I\vec{\Omega}$$

Όπου

$\vec{\Omega}$:διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας (rad/s)

\vec{H} : διάνυσμα γωνιακής ορμής (kg ×m²/s)

I :ροπή αδράνειας (kg ×m²)

Γνωρίζουμε ότι για να μεταβάλλουμε την γραμμική ορμή ενός αντικειμένου πρέπει να ασκηθεί σε αυτό κάποια δύναμη. Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \dot{\vec{p}}$$

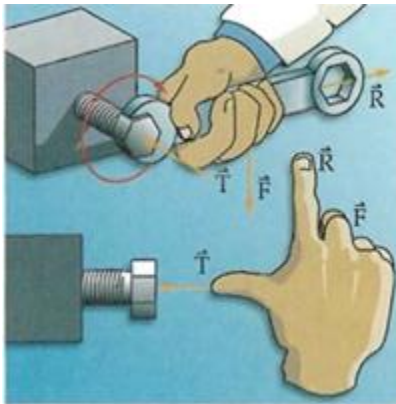
Όπου

\vec{F} :διάνυσμα δύναμης (N)

\vec{p} :διάνυσμα γραμμικής ορμής (kg×m/s)

$\dot{\vec{p}}$: χρονική παράγωγος διανύσματος ορμής (kg×m/s²)

Καταλαβαίνουμε καθημερινά ότι η εφαρμογή δύναμης σε μια μάζα αλλάζει την ταχύτητά της. Πώς όμως εφαρμόζουμε δύναμη σε μια περιστρεφόμενη μάζα; Αν ασκήσουμε δύναμη σε έναν αθλητή του πατινάζ που περιστρέφεται, αυτός θα αρχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή κατά μήκος του πάγου ενώ θα συνεχίσει να γυρίζει. Τι γίνεται αν θέλουμε να αλλάξουμε μόνο το ρυθμό ή την κατεύθυνση της περιστροφής, χωρίς να τον μετακινήσουμε; Τότε πρέπει να εφαρμόσουμε ροπή. Μια ροπή στρέψης είναι μια δύναμη που προκύπτει όταν προσπαθούμε να περιστρέψουμε ένα αντικείμενο, όπως όταν χρησιμοποιούμε ένα κλειδί για να γυρίσουμε ένα μπουλόνι. Εφαρμόζουμε μια δύναμη σε κάποια απόσταση από το μπουλόνι, δημιουργώντας μια ροπή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.



Σχήμα 7 Ροπή Στρέψης

Μια ροπή στρέψης σε μια κατεύθυνση σφίγγει το μπουλόνι. Μια ροπή προς την άλλη κατεύθυνση το χαλαρώνει. Μαθηματικά, ορίζουμε το διάνυσμα της ροπής ως το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος του φορέα θέσης της εφαρμοζόμενης δύναμης με το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης δύναμης. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού μπορούμε να υπολογίσουμε τη ροπή ως:

$$\vec{T} = \vec{R} \times \vec{F}$$

Όπου

\vec{T} : διάνυσμα ροπής (Nm)

\vec{R} : απόσταση από κέντρο μάζας έως το σημείο που εφαρμόζεται η δύναμη (m)

\vec{F} : διάνυσμα εφαρμοζόμενης δύναμης (N)

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση, μπορούμε να πάρουμε περισσότερη ροπή με την ίδια δύναμη απλά εφαρμόζοντας τη δύναμη μακρύτερα από το κέντρο περιστροφής. Για παράδειγμα, αν πιέσουμε την άκρη της πόρτας, μακριά από τους μεντεσέδες, η πόρτα κουνιέται εύκολα. Αν πιέσουμε την πόρτα ακριβώς δίπλα στους μεντεσέδες, είναι πολύ πιο δύσκολο να την περιστρέψουμε. Επιστρέφοντας στον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα, μπορούμε τώρα να συνδέσουμε τη ροπή και τη γωνιακή ορμή. Ακριβώς όπως η δύναμη ισούται με το ρυθμό μεταβολής της γραμμικής ορμής, η ροπή είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ορμής. Με άλλα λόγια, αν εφαρμόσουμε μια ροπή σε ένα αντικείμενο, η γωνιακή του ορμή θα αλλάξει μέσω της σχέσης:

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}}{dt} = \dot{\vec{H}}$$

\vec{T} :διάνυσμα ροπής (Nm)

\vec{H} : διάνυσμα γωνιακής ορμής (kg ×m²/s)

$\dot{\vec{H}}$: χρονική παράγωγος διανύσματος γωνιακής ορμής (kg×m/s²)

Συνεπώς, όταν η ροπή είναι μηδενική, η γωνιακή ορμή παραμένει σταθερή. Αργότερα, θα δούμε ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη βασική αρχή για να ελέγξουμε τον προσανατολισμό ενός διαστημικού σκάφους. Θυμηθείτε ότι αν εφαρμόσουμε μια δύναμη σε ένα αντικείμενο, θα επιταχυνθεί. Ομοίως, αν εφαρμόσουμε μια ροπή στρέψης σε ένα αντικείμενο, θα αρχίσει να γυρίζει γρηγορότερα και ταχύτερα. Δηλαδή, θα αποκτήσει γωνιακή επιτάχυνση, $\vec{\alpha}$. Συνεπώς:

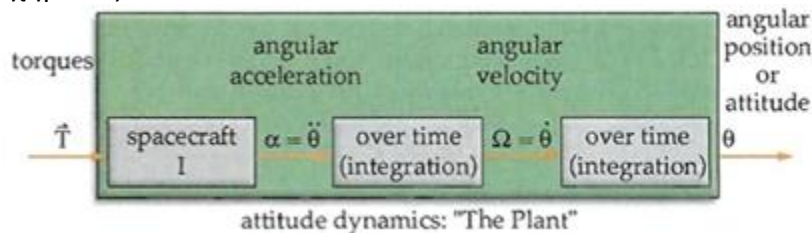
$$\vec{T} = \dot{\vec{H}} = I\vec{\alpha}$$

Όπου

I :ροπή αδράνειας (kg ×m²)

$\vec{\alpha}$:διάνυσμα γωνιακής επιτάχυνσης (rad /s²)

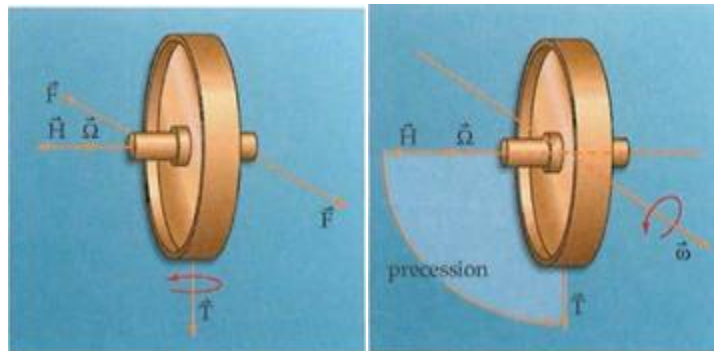
Όπως γνωρίζουμε από τη γραμμική κίνηση, καθώς κάτι επιταχύνεται, η ταχύτητα του αυξάνεται. Εάν αφήσουμε μια μπάλα από κάποιο ύψος, αυτή επιταχύνει, κερδίζει ταχύτητα και πέφτει γρηγορότερα με το χρόνο. Ομοίως, όταν ένα αντικείμενο έχει γωνιακή επιτάχυνση με την πάροδο του χρόνου, η γωνιακή ταχύτητα του, $\vec{\Omega}$, αυξάνεται. Έτσι, για να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό ενός διαστημοπλοίου, που περιγράφεται από μια γωνία θ (γωνία κατά την οποία το διαστημικό σκάφος έχει περιστραφεί σε σχέση με τον προηγούμενο προσανατολισμό), πρέπει να βρούμε το χρονικό διάστημα που επιταχύνεται και το χρονικό διάστημα που κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα. Με άλλα λόγια, εφαρμόζοντας μια ροπή στρέψης σε ένα μη περιστρεφόμενο αντικείμενο (όπως ένα διαστημικό σκάφος), δημιουργούμε γωνιακή επιτάχυνση, οδηγώντας σε γωνιακή ταχύτητα και συνεπώς σε αλλαγή γωνιακής θέσης. Το μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά των διαστημικών σκαφών φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 8.



Σχήμα 8 Δομικό Σχήμα υποσυστήματος δυναμικού προσανατολισμού. Η ροπή που εφαρμόζεται στον δορυφόρο προκαλεί γωνιακή επιτάχυνση. Στον χρόνο η επιτάχυνση αυξάνει την γωνιακή ταχύτητα προκαλώντας μεταβολή του προσανατολισμού (στάση) του δορυφόρου (γωνίες περιστροφής)

Όταν εφαρμόζουμε μια ροπή σε ένα μη-περιστρεφόμενο διαστημικό σκάφος, συμβαίνουν πράγματα εύκολα προβλέψιμα. Για παράδειγμα, όταν γυρίζουμε μια βίδα με ένα κατσαβίδι, περιστρέφεται με τον τρόπο που περιμένουμε. Αν όμως το διαστημικό σκάφος γυρίζει όταν εφαρμόζουμε τη ροπή, η δυναμική γίνεται πιο περίπλοκη. Όπως γνωρίζουμε, ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο έχει γωνιακή ορμή. Εάν εφαρμόσουμε μια ροπή παράλληλη προς την κατεύθυνση της γωνιακής ορμής, προκαλεί γωνιακή επιτάχυνση και αλλαγή στη γωνιακή ταχύτητα. Ωστόσο, αν εφαρμόσουμε τη ροπή σε κατεύθυνση μη παράλληλη προς το διάνυσμα της γωνιακής ορμής, συμβαίνει κάτι διαφορετικό.

Στο σχήμα 9 (δεξιά), έχουμε ένα περιστρεφόμενο δίσκο με ένα ζεύγος δυνάμεων (ροπές στρέψης) που εφαρμόζεται σε αυτό. Θα περιμένατε η μάζα να περιστραφεί προς την ίδια κατεύθυνση που ασκείται η ροπή αλλά αυτό δεν συμβαίνει! Η μάζα αρχίζει να περιστρέφεται αριστερόστροφα γύρω από έναν άξονα που βγαίνει από τη σελίδα! Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μετάπτωση.



Σχήμα 9: (Δεξιά) Εφαρμογή ροπής σε περιστρεφόμενο δίσκο (Αριστερά) Μετάπτωση περιστρεφόμενου δίσκου

Για τον δίσκο που φαίνεται στο σχήμα 9 (αριστερά), το διάνυσμα \vec{H} θα αρχίσει να μετακινείται προς το διάνυσμα \vec{T} (τα πράγματα θα ήταν διαφορετικά αν είχαμε αντικείμενο διαφορετικού σχήματος). Αυτή η μετακίνηση/μετάπτωση εμφανίζεται γύρω από ένα τρίτο διάνυσμα που ονομάζεται διάνυσμα μετάπτωσης, $\vec{\omega}$, και είναι κάθετο τόσο στο \vec{H} όσο και στο \vec{T} .

Για σταθερή ροπή στρέψης, ο ρυθμός μετάπτωσης είναι επίσης σταθερός. Δεν επιταχύνεται, όπως θα περίμενε κανείς! Όπως θα δούμε, το να γνωρίζουμε πώς ένα διαστημικό σκάφος κερδίζει γωνιακή ταχύτητα και τον τρόπο που πραγματοποιείται η μετάπτωση σε αυτό μας βοηθά να καθορίσουμε τις δυνάμεις για να προσαρμόσουμε τον προσανατολισμό του. Σημειώστε ότι η κατεύθυνση της μετάπτωσης εξαρτάται από το πως κατανέμεται η μάζα στο αντικείμενο - η ροπή αδράνειας της μάζας. Αναλύοντας τους λόγους για τους οποίους υπάρχει η μετάπτωση είναι πέρα από το πεδίο αυτού του βιβλίου.

Υπάρχει ένα ακόμη σημαντικό αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός περιστρεφόμενου διαστημικού σκάφους και μιας εφαρμοζόμενης ροπής. Όλοι γνωρίζουμε αυτό μια μπάλα ή μια σφαίρα που περιστρέφεται φτάνει μακρύτερα από μία αντίστοιχη που δεν περιστρέφεται. Αυτό συμβαίνει επειδή η περιστροφή τις κάνει πιο σταθερές και ανθεκτικές σε εξωτερικές ροπές. Όσο πιο γρήγορα γυρίζουν, τόσο πιο σταθερές γίνονται. Αυτή η σταθερότητα αναφέρεται ως γυροσκοπική σταθεροποίηση ενός αντικειμένου. Η μαθηματική εξήγηση για το τι κάνει ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο "πιο σταθερό" από ένα μη-περιστρεφόμενο αντικείμενο είναι πέρα από το πεδίο της συζήτησης μας. Ωστόσο, όπως θα δούμε, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αυτό το γεγονός για να κρατήσουμε το διαστημικό σκάφος στον προσανατολισμό που θέλουμε.

Εξωτερικές ροπές – Διαταραχές

Γιατί λοιπόν δεν μπορούμε απλά να αφήσουμε τον δορυφόρο στο διάστημα με έναν συγκεκριμένο προσανατολισμό χωρίς να ασχοληθούμε ξανά μαζί του; Με την πάροδο του χρόνου, ακόμα και αν εμείς δεν κάνουμε τίποτα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που ονομάζονται διαταραχές θα οδηγήσουν ένα διαστημικό σκάφος μακριά από τον αρχικό προσανατολισμό του. Αυτές οι ροπές είναι εξαιρετικά μικρές (στις περισσότερες περιπτώσεις, κυριολεκτικά δεν μπορούσαν να σκοτώσουν μια μύγα) αλλά όπως οι μικροσκοπικές σταγόνες νερού μπορούν να διαβρώσουν τα βουνά με την πάροδο του χρόνου, έτσι και αυτές οι ροπές μπορούν τελικά να περιστρέψουν ακόμη και πολύ μεγάλα διαστημικά σκάφη. Μας απασχολούν τέσσερις κύριες πηγές εξωτερικών ροπών-διαταραχών:

- Βάθμωση βαρύτητας
- Η πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Το μαγνητικό πεδίο της Γης
- Ατμοσφαιρική οπισθέλκουσα/αεροδυναμική τριβή

Ο ελεγκτής

Έως τώρα είδαμε τη δυναμική ενός περιστρεφόμενου συστήματος για να καταλάβουμε πως οι ροπές επηρεάζουν την γωνιακή ορμή ενός διαστημικού σκάφους συμπεριλαμβανομένων των διαταραχών. Τώρα μπορούμε να δούμε στον «εγκέφαλο» της υποσυστήματος προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού εξετάζοντας τον ελεγκτή.

Η δουλειά του ελεγκτή είναι να παράγει εντολές στους ενεργοποιητές ώστε το διαστημικό σκάφος να περιστραφεί στη σωστή διεύθυνση ανάλογα με τις απαιτήσεις της αποστολής, με συγκεκριμένη ακρίβεια και ρυθμό περιστροφής. Ο ελεγκτής πρέπει να γνωρίζει:

- Τι γίνεται τώρα
- Τι μπορεί να συμβεί στο μέλλον

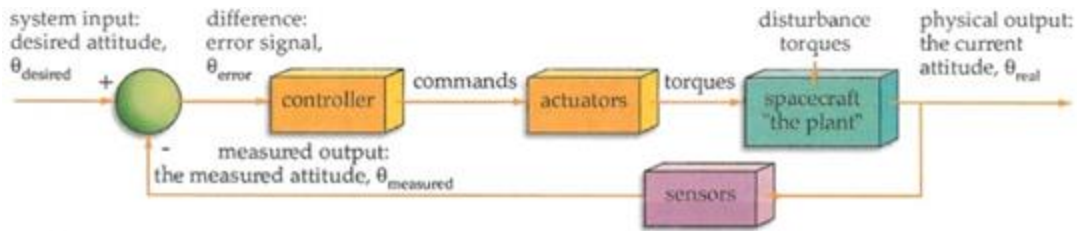
- Τι έγινε στο παρελθόν

Το να γνωρίζει τι συμβαίνει τώρα είναι αρκετά εύκολο - ο ελεγκτής απλώς ζητά από τους αισθητήρες να υπολογίσουν τον τρέχοντα προσανατολισμό. Στη συνέχεια τον συγκρίνει με τον επιθυμητό προσανατολισμό. Η διαφορά αυτή είναι το σήμα σφάλματος. Με βάση αυτό το σήμα σφάλματος, ο ελεγκτής κατευθύνει το διαστημικό σκάφος στο σωστό προσανατολισμό. Δηλαδή, αν ο τρέχων προσανατολισμός είναι 10° λάθος (σφάλμα), ο ελεγκτής παράγει ένα σήμα για μια αλλαγή 10° . Αυτό είναι γνωστό ως αναλογικός έλεγχος και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

Ωστόσο, η πρόβλεψη του τι θα συμβεί και η μνήμη του τι συνέβη στο παρελθόν μπορεί να είναι εξίσου σημαντικά. Για παράδειγμα, αν χρειαστεί να σταματήσετε σε μια πινακίδα 'stop', πρέπει να ξέρετε όχι μόνο που βρίσκεστε, αλλά και πόσο γρήγορα κινείστε, ώστε να μπορέσετε να πατήσετε τα φρένα σας εγκαίρως. Ομοίως, για να αποκτήσει ένα διαστημικό σκάφος τον επιθυμητό προσανατολισμό, ο ελεγκτής του θα πρέπει να παρακολουθεί τον ρυθμό περιστροφής, καθώς και τον τρέχοντα προσανατολισμό του. Μπορείτε να σκέφτεστε αυτόν τον υπολογισμό του ρυθμού περιστροφής ως παράγωγο. Γνωρίζοντας τον ρυθμό περιστροφής ο χειριστής μπορεί να καθορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τον τρόπο χειρισμού των ενεργοποιητών για να επιτύχει καλύτερη ακρίβεια. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διαφορικός έλεγχος.

Μερικές φορές μπορούμε να έχουμε καλύτερη ακρίβεια παρακολουθώντας πόσο κοντά είμαστε στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι ο ελεγκτής να παρακολουθεί τη γωνιακή διαφορά μεταξύ του μετρούμενου και του επιθυμητού προσανατολισμού, $\Delta\theta$. Όταν το διαστημικό σκάφος φτάσει στον επιθυμητό προσανατολισμό, αυτή η διαφορά, $\Delta\theta$, θα γίνει μηδέν. Εάν το σύστημα σταματήσει τους ενεργοποιητές του σε αυτό το σημείο, ο προσανατολισμός θα αρχίσει αμέσως να αλλάζει εξαιτίας των εξωτερικών ροπών-διαταραχών. Ένας έξυπνος ελεγκτής, ωστόσο, δεν θα κοιτάξει μόνο τη στιγμιαία $\Delta\theta$. Αντ' αυτού, θα διατηρούσε ένα ιστορικό, αθροίζοντας τα $\Delta\theta$ με την πάροδο του χρόνου. Το αποτέλεσμα θα ήταν πάντα κάποια τιμή διαφορετική από το μηδέν που θα έλεγε στον ελεγκτή πόση ροπή να δημιουργήσει στη μόνιμη για να αντισταθμίσει τις διαταραχές. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ολοκλήρωση, γι' αυτό και ονομάζουμε αυτό το είδος ελέγχου ως ολοκληρωτικός έλεγχος. Οι σχεδιαστές τον χρησιμοποιούν για έλεγχο προσανατολισμό ώστε να πετύχουν υψηλή ακρίβεια.

Ανεξάρτητα από το σχήμα που χρησιμοποιείται, ο ελεγκτής συνδυάζει τις παρελθοντικές και τις τρέχουσες μετρήσεις του με την ικανότητα πρόβλεψης μιας μελλοντικής συμπεριφοράς για να αποφασίσει πως να χειριστεί τους ενεργοποιητές. Ένα σχηματικό διάγραμμα του υποσυστήματος ελέγχου προσανατολισμού ενός διαστημικού σκάφους δίνεται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Το Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS) περιλαμβάνει ως σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου τα εξής κύρια στοιχεία: ελεγκτής ή κατευθυντής (controller), επενεργητής ή ενεργοποιητής (actuator), Δορυφόρο (plant/σύστημα), αισθητήρες (sensors) που λειτουργούν ως ένα αυτόματο σύστημα που διατηρεί ή μεταβάλλει τον προσανατολισμό (attitude) του δορυφόρου ανάλογα με τις προδιαγραφές/ανάγκες της αποστολής