

CONOPS SECOND STAGE

1. System Scope.

1.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία περισυλλογής του άνω σταδίου του πυραύλου από τον διαστημικό σταθμό, σε τροχιά, αποτελεί τη δεύτερη και πιο κρίσιμη φάση του Concept of Operations (ConOps) της αποστολής. Αφού το σκάφος μεταφοράς (transporter) ολοκληρώσει την αρχική προσέγγιση, περισυλλέξει το άνω στάδιο και πραγματοποιηθεί μία αρχική ανάλυση αυτού και το οδηγήσει σε τροχιά ίδιου ύψους με τον σταθμό, ενεργοποιείται ο μηχανισμός τελικής αιχμαλώτισης.

1.2. Ορίζοντας τις αρχικές συνθήκες.

Για τη δυναμική σύζευξη του συστήματος σταδίου-σταθμού, θεωρούνται απαραίτητες οι ακόλουθες επιχειρησιακές προϋποθέσεις και αρχικές συνθήκες:

1. Μηδενική Διαφορά Γωνιακής Ταχύτητας ($\Delta\omega=0$): Καθώς και τα δύο σώματα κινούνται στο ίδιο τροχιακό ύψος (ίδια απόσταση από το κέντρο μάζας της Γης), η διαφορά της γωνιακής τους ταχύτητας ως προς τη Γη είναι μηδενική.
2. Ελεγχόμενη Σχετική Ταχύτητα Προσέγγισης ($\Delta v \approx 0$): Η σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο σωμάτων θεωρείται προσεγγιστικά μηδενική. Το άνω στάδιο διατηρεί μια ελάχιστη, σταθερή και ομαλή ταχύτητα (relative velocity vector) προκειμένου να επιτευχθεί η ελεγχόμενη προσέγγιση.
3. Ιδανικό Παράθυρο Ταχύτητας: Η σχετική ταχύτητα προσέγγισης που έχει αποκτήσει το άνω στάδιο κυμαίνεται ιδανικά μεταξύ 0,05 m/s και 0,1 m/s, επιτρέποντας την ασφαλή επαφή χωρίς υψηλά φορτία κρούσης.
4. Απουσία Περιστροφής γύρω από το Κέντρο Μάζας: Το σκάφος μεταφοράς εκτελεί μια απόλυτα ομαλή απελευθέρωση του άνω σταδίου, με αποτέλεσμα να ακυρωθούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας του σταδίου, εκτός από αυτόν που επιτρέπει την ευθύγραμμη κίνησή του ως προς τον σταθμό.. Το αντικείμενο λοιπόν, είναι σταθεροποιημένο και δεν παρουσιάζει tumbling (περιστροφή γύρω από το κέντρο μάζας του).

* Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω ιδανικές αρχικές συνθήκες και την απουσία εξωτερικών δυνάμεων λόγω συνθηκών μικροβαρύτητας [1] το δυναμικό πρόβλημα απλοποιείται σημαντικά: **το σύστημα μοντελοποιείται ως μια διάταξη τεσσάρων ρομποτικών βραχιόνων, οι οποίοι λειτουργούν συντονισμένα με σκοπό να εκμηδενίσουν τον έναν εναπομένοντα βαθμό ελευθερίας (1 DoF) του σώματος κατά τον άξονα προσέγγισης.**

1.3. Mission Requirements.

Για τον σχεδιασμό του συστήματος έχουν προκαθοριστεί οι εξής απαιτήσεις **requirements:**

MSR-01 : Η επιχείρηση πρέπει να πραγματοποιηθεί σε LEO.

MSR-02 : Το σύστημα πρέπει να είναι ικανό να εκτελέσει αυτόνομη τροχιακή αιχμαλώτιση (In-Orbit Capture) του άνω σταδίου ενός πυραύλου Ariane 5.

SYS-FUN-01: Η αιχμαλώτιση πρέπει να υλοποιηθεί μέσω διάταξης τεσσάρων (4) ρομποτικών βραχιόνων.

SYS-FUN-02 : Το σύστημα ελέγχου των βραχιόνων πρέπει να σχεδιαστεί με βάση την εκμηδένιση του ενός ελεύθερου βαθμού ελευθερίας (1 DoF) του target κατά τον άξονα προσέγγισης.

SYS-FUN-03 : Το σκάφος πρέπει να διαθέτει σύστημα σχετικής πλοήγησης (Relative Navigation) σε πραγματικό χρόνο για τον προσδιορισμό της κινητικής κατάστασης του στόχου.

SYS-FUN-04: Θα πρέπει να υπάρχει χωρικό περιθώριο ώστε να πραγματοποιηθεί ο ελιγμός του άνω σταδίου κατά την τρίτη φάση του ConOps.

SYS-PERF-01 : Η σχετική ταχύτητα προσέγγισης κατά την τελική φάση πρέπει να διατηρείται εντός του ονομαστικού εύρους 0,05-0,1 m/s

SYS-PERF-02 : Δεν πρέπει να υπάρξει χρονικός ασυγχρονισμός μεταξύ των 4 βραχιόνων κατά την επαφή των βραχιόνων και του payload ring.

SYS-SAF-01 : Όλα τα κρίσιμα δομικά στοιχεία (βραχίονες, βάσεις κινητήρων και αποσβεστήρες) πρέπει να σχεδιαστούν με ελάχιστο Συντελεστή Ασφαλείας SF>2

SYS-SAF-02 : Σε περίπτωση μη ονομαστικής απόκλισης (non-nominal anomaly) πριν την επαφή, το σύστημα πρέπει να εκτελεί αυτόματα Ελιγμό Αποφυγής Σύγκρουσης .

SYS-SAF-03 : Το σύστημα πρέπει να λειτουργεί απρόσκοπτα σε συνθήκες μικροβαρύτητας και θερμικού κενού και να είναι θωρακισμένο απέναντι στην κοσμική ακτινοβολία.

1.4. Σημείο αιχμαλώτισης.

Η αιχμαλώτιση του άνω σταδίου από το σύστημα θα γίνεται από το payload ring .Ο δακτύλιος αυτός αποτελεί το πλέον δομικά ακέραιο τμήμα του target, διατηρώντας τις μηχανικές του ιδιότητες αναλλοίωτες στο απαιτητικό περιβάλλον του διαστημικού κενού. Λόγω του αρχικού σχεδιασμού του —ο οποίος επιβάλλει την ασφαλή μεταφορά του δορυφόρου και την ανάληψη των ακραίων δυναμικών φορτίων και δονήσεων κατά τη φάση της εκτόξευσης— το Payload Ring διαθέτει υψηλή ακαμψία. Αντίθετα, το ακροφύσιο του κινητήρα, είναι σχεδιασμένο ως μια

λεπτότοιχη δομή βελτιστοποιημένη αποκλειστικά για την αντοχή σε ακραίες θερμικές μεταβολές

Λόγω της απελευθέρωσής του payload από τον δακτύλιο, ενδέχεται να υπάρχουν εξογκώματα, φθορές ή καλώδια που εξέχουν από το ring, κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Επιπροσθέτως το άνω στάδιο δεν περιστρέφεται, επομένως έχει μια πλευρά μονίμως εκτεθειμένη στον Ήλιο και μία στο κρύο κενό του διαστήματος, δημιουργώντας τεράστια διαφορά θερμοκρασίας, παραμορφώνοντας ελαφρώς σχηματικά το payload ring, λόγω θερμικών συστολών-διαστολών που εφαρμόζονται στο υλικό.

Συμπερασματικά, θα πρέπει να υπάρξει ένα εικονικό/αισθητηριακό σύστημα που θα πράττει γεωμετρική ανάλυση του δακτυλίου. Γενικά όμως, ο δακτύλιος του Ariane 5(PAS interface), αποτελεί γεωμετρικά μια ομοιόμορφη επιφάνεια, χωρίς κάποιον κίνδυνο το σύστημα των βραχιόνων να ολισθήσει. Επίσης ο γεωμετρικός σχεδιασμός επιτρέπει soft καθώς και hard capture.

1.5. Σύστημα αιχμαλώτισης- οι βραχίονες

Το σύστημα των βραχιόνων μπορεί να εκτελέσει την σύλληψη του στόχου πολύ πιο εύκολα από άλλες υπάρχουσες μεθόδους, καθώς και αποτελεί ένα επαναχρησιμοποιούμενο σύστημα.

Για την αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου συστήματος αντλήθηκαν στοιχεία από την έρευνα των από την ερευνητική εργασία των Y. Zhang και Q. Zhan, με τίτλο "The Capturing of Space Debris with a Spaceborne Multi-fingered Gripper" [1].

Ο στόχος ο οποίος αναλύθηκε στην έρευνα είναι ο SwissCube, ένας cubesat νανοδορυφόρος μεγέθους 1U, δηλαδή πολύ μικρότερος από την δικό μας. Με βάση προηγούμενα trade off studies που είχαν πραγματοποιηθεί καθώς και από τα αποτελέσματα της έρευνας[1], ο ιδανικός αριθμός των βραχιόνων που θα αιχμαλωτίσουν το άνω στάδιο, είναι $N=4$, τοποθετημένοι μεταξύ τους ανά 90 μοίρες:

Με βάση την robot grasping theory χρειαζόμαστε τουλάχιστον 3 βραχίονες σε ένα τέτοιο σύστημα για να αποκτήσουμε πλήρη έλεγχο του σώματος, καθώς και να εξασφαλιστεί μια σταθερή λαβή στον χώρο. Αλλά, όσο πιο μεγάλο είναι το άνοιγμα(σε μοίρες) μεταξύ των βραχιόνων, τόσο πιο μεγάλη είναι και η πιθανότητα να διαφύγει το σώμα από το σύστημα αιχμαλώτισης ή να μην υπάρξει πλήρης έλεγχος όλων των βαθμών ελευθερίας του.

Με πάνω από 4 βραχίονες σε ένα τέτοιο σύστημα, θα ανέβαινε πολύ η πολυπλοκότητά του, καθώς και τα mass και power budgets, εάν και θα υπήρχε λιγότερη πιθανότητα διαφυγής του σώματος και καλύτερος διαμερισμός της ορμής στους κινητήρες. Στην τελική αρχιτεκτονική του συστήματος, δεν υπήρξε

ανάγκη για κάποιον επιπλέον βραχίονα στο σύστημα, εάν και θα πρέπει να γίνει επιπλέον έρευνα στο μέλλον, καθώς δεν έχει υπολογισθεί η ορμή που απαιτείται.

2.Conops: Η σύλληψη του στόχου.

Η αιχμαλώτηση του στόχου έχει τρεις κύριες φάσεις:

I. Προσέγγιση και ανάλυση του στόχου

II. Φάση αιχμαλώτισης(capture phase)

III. Μανούβρα εισόδου.

IV: Είσοδος στον σταθμό.

2.1 Κύρια Φάση I - Προσέγγιση και ανάλυση του στόχου

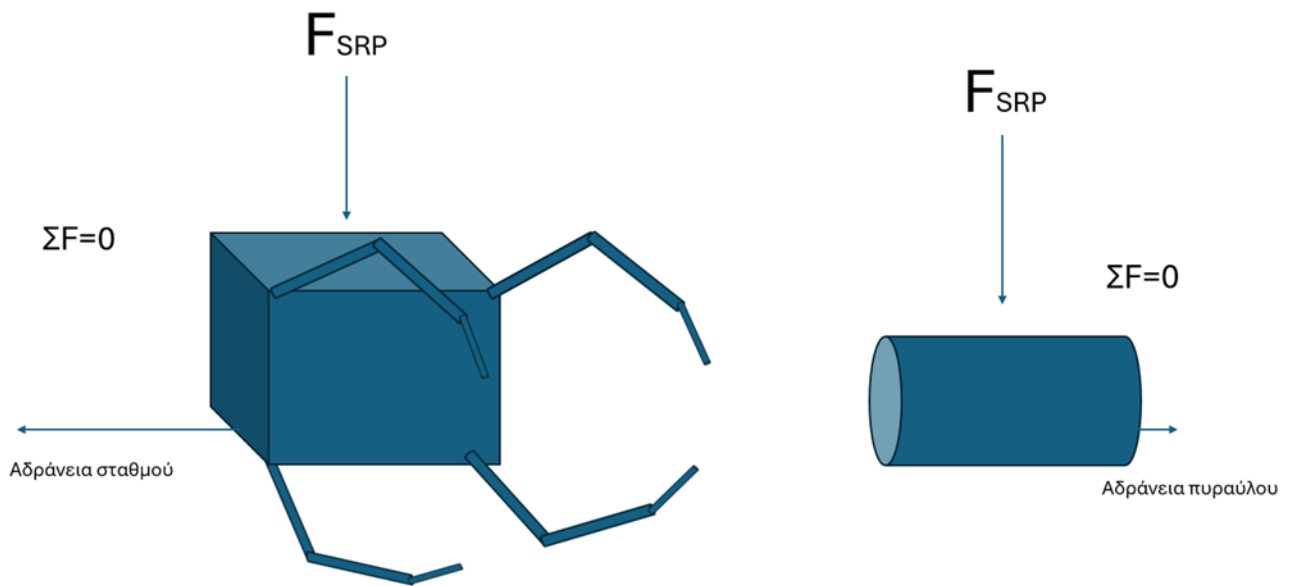
Κατά τη φάση προσέγγισης του άνω σταδίου, τα αισθητηριακά συστήματα (sensors) —τα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα είτε στον προθάλαμο υποδοχής [2] είτε απευθείας επάνω στους ρομποτικούς βραχίονες— υποχρεούνται να εκτελέσουν δυναμική γεωμετρική ανάλυση και τρισδιάστατη αναγνώριση προτύπων του Payload Ring.

Σε πρακτικό επίπεδο, η γεωμετρία της στεφάνης δεν παρουσιάζει απόλυτη ομοιομορφία, καθώς υπόκειται σε μικροπαραμορφώσεις λόγω των ακραίων θερμοκρασιακών αλλαγών (thermal gradients) που αναπτύσσονται στο περιβάλλον του διαστημικού κενού. Συνεπώς, η επιτόπια γεωμετρική ταυτοποίηση του Payload Ring κρίνεται επιβεβλημένη, ακόμη και αν αυτή έχει προηγηθεί.

Η διαδικασία αυτή της γεωμετρικής ανάλυσης πρέπει να ξεκινά και να ολοκληρώνεται σε ικανή απόσταση ασφαλείας (standoff distance). Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται το απαιτούμενο χρονικό περιθώριο αντίδρασης (time-to-abort) και η απαραίτητη απόσταση ελιγμών, ώστε σε περίπτωση εμφάνισης αστοχίας να ενεργοποιηθεί άμεσα και με ασφάλεια το πρωτόκολλο εγκατάλειψης της επιχείρησης (**Operation Abort / Collision Avoidance Manoeuvre**).

2.2 Δυναμική συστήματος:

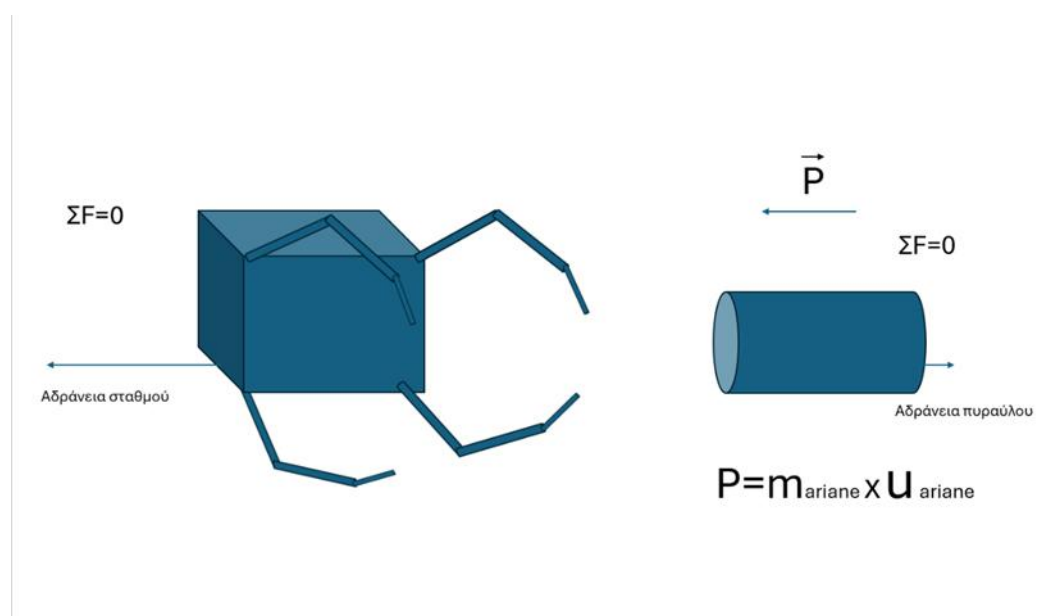
Στην εικόνα 1, παρουσιάζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα:



Εικ.1 Τα σώματα βρίσκονται σε μία ενδεικτική απόσταση των 500 μέτρων. Προς το παρόν, οι μόνες δυνάμεις που ασκούνται η solar radiation pressure, και η gravitational gradient, η οποία δεν απεικονίζεται. Δεν έχει ληφθεί υπόψιν το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων. Η αντίσταση από την πολύ αραιή ατμόσφαιρα θεωρείται ανύπαρκτη, καθώς ο σταθμός θα βρίσκεται σε ένα υψόμετρο μεταξύ 800-1.000 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης.

2.3 Ορμή στο σύστημα:

Αρχικά:



Εικ.2. Εδώ αναλύεται η ορμή του συστήματος

Εάν υποθέσουμε πως ο πύραυλος έχει μια σταθερή ταχύτητα 2m/s μετά από μία ομαλή απελευθέρωση και οι δυνάμεις που του ασκούνται, ασκούνται για ένα μικρό χρονικό διάστημα για να έχουνε κάποια επίδραση, τότε το σώμα κινείται ευθύγραμμα και ομαλά(κατά προσέγγιση).

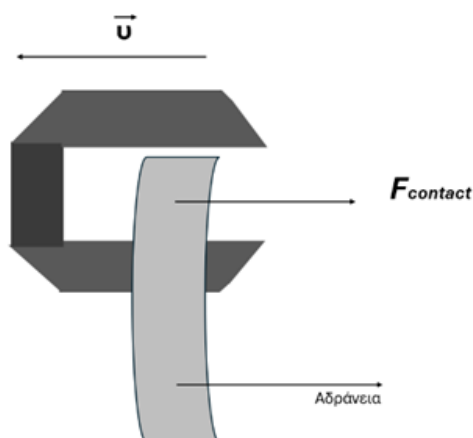
Άρα η ορμή του συστήματος είναι περίπου 9080 kg m/s(εάν υποθέσουμε ότι η σχετική ταχύτητα του σταθμού είναι μηδέν και η dry mass του άνω σταδίου είναι 4.540).

2.3 Φάση I (capture phase)

2.3.1 Τα LAR Grippers[3]:

Στις άκρες κάθε βραχίονα βρίσκεται και από ένα LAR gripper οπού το καθένα ασκεί κάθετη δύναμη στον δακτύλιο ώστε να γίνει η αιχμαλώτιση. Η σχεδιαστική φιλοσοφία και τα κριτήρια διαμόρφωσης του ρομποτικού μηχανισμού βασίζονται στις αρχές σχεδιασμού που προτάθηκαν από τους Kozłowski κ.ά. [3] για τη σύλληψη προετοιμασμένων (prepared) και μη προετοιμασμένων (unprepared) τεχνητών δορυφόρων. Συγκεκριμένα, η γεωμετρία των υιοθετεί τη λογική της "λειτουργικής ευελιξίας" (design versatility), εξασφαλίζοντας ότι ο μηχανισμός των claws, μπορεί να προσαρμοστεί μελλοντικά και σε άλλες δομικές επιφάνειες πέραν του τυπικού δακτυλίου Payload Adapter του Ariane 5.

2.3.2 Η πρώτη φάση της διαδικασίας θα είναι το soft capture, δηλαδή τα LAR grippers θα αιχμαλωτίσουν μεν τον δακτύλιο, αλλά δεν θα ασκηθεί κάποια κάθετη δύναμη, παρά μόνο θα πραγματοποιηθεί μια ελεγχόμενη ελαστική κρούση.



Εικ.3. Απεικονίζεται η φάση του soft capture όπου απορροφάται μέρος της κινητικής ενέργειας του σώματος από τους αποσβεστήρες.

Όταν το άνω στάδιο εκτελεί την κρούση με τον σταθμό, δημιουργείται μία δύναμη επαφής. Σύμφωνα με τον θεμελιώδη νόμο της μηχανικής η δύναμη αυτή θα ισούται με την ορμή του συστήματος προς το χρονικό διάστημα της κρούσης. Εάν και η ορμή είναι γνωστή, για την εύρεση του χρονικού διαστήματος Δt χρειάζονται περισσότερα δεδομένα και προσομοιώσεις.

2.3.3 Απορρόφηση κινητικής ενέργειας

Στα grippers βρίσκονται αποσβεστήρες με σκοπό την απορρόφηση μέρους της κινητικής ενέργειας του άνω σταδίου, μειώνοντας και κατά μεγάλο μέρος την ορμή του. Δεν χρειάζεται να γίνει ολόκληρη η απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του σώματος. Εάν η συνολική κινητική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$K = \frac{m_{\text{ariane}} * u_{\text{ariane}}^2}{2}$$

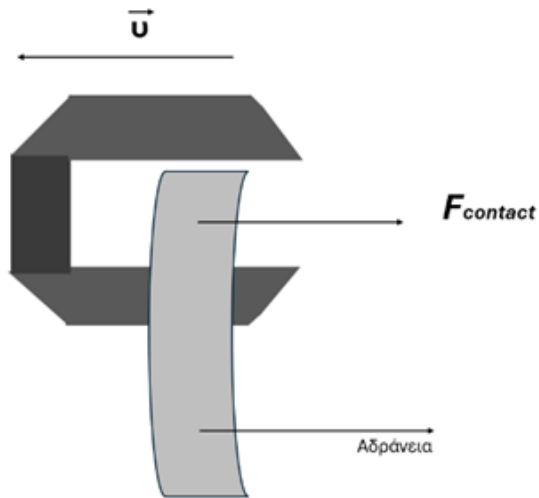
, τότε θα πρέπει να απορροφηθεί μονάχα ένα ποσοστό αυτής.

Η κινητική ενέργεια αυτή, στην συνέχεια, διαχέεται ελεγχόμενα μέσω των αποσβεστήρων και γίνεται θερμότητα. Να σημειωθεί πως θα υπάρξουν συμπιέσεις σε ορισμένα μηχανολογικά μέρη των LAR grippers και των βραχιόνων ανάλογες του μεγέθους της κρούσης. Τέλος, η απότομη μεταφορά ορμής στο σύστημα θα αλλάξει τον προσανατολισμό του σταθμού ως προς το άνω στάδιο και το ανάποδο, πάλι ανάλογα των δυνάμεων που θα ασκηθούν στο σύστημα. Οπότε θα πρέπει να πρέπει εν ώρα της διαδικασίας να είναι ενεργοποιημένα τα γυροσκόπια του σταθμού καθώς και τα RCS για μικροδιορθώσεις.

2.4. Φάση II

Η δεύτερη φάση της διαδικασίας είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε soft και hard capture. Μετά το soft capture, θα ασκηθεί στο άνω στάδιο η αντίδραση της δύναμης επαφής καθώς και ο σταθμός θα αρχίσει να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οπότε, θα πρέπει η διαδικασία του hard capture να συμβεί μέσα σε αυτό το μικρό χρονικό παράθυρο, όπου να μην γίνονται μικροδιορθώσεις από τα guidance systems, αλλά όχι περιττές, ώστε να εξοικονομηθεί όσο το λιγότερο καύσιμο. Όπου ναι μεν, τα σώματα κινούνται προσεγγιστικά σε αντίθετες κατευθύνσεις, αλλά θα πρέπει το σύστημα να αιχμαλωτήσει τον δακτύλιο σε ένα σημείο όπου δεν υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης.

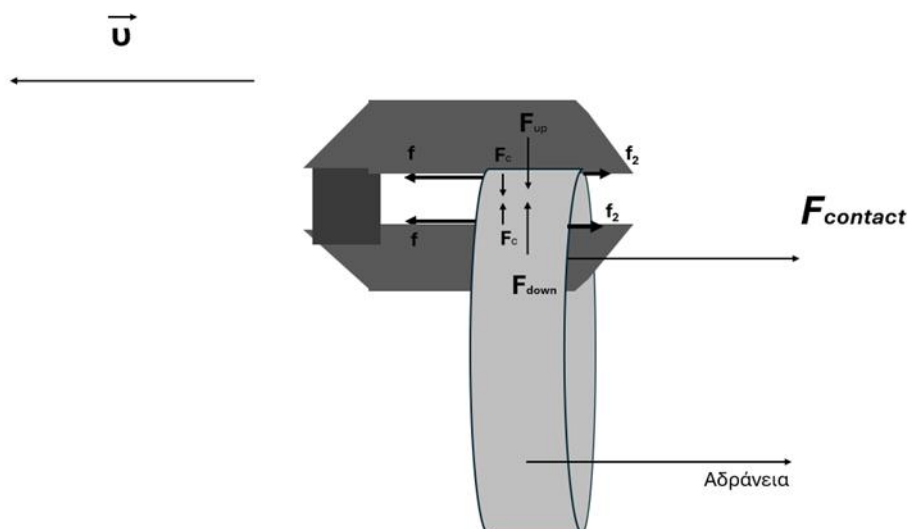
Για αυτόν τον λόγο, κατά την διάρκεια του σχεδιασμού θα πρέπει να υπάρχει ένα margin στο μήκος των claws.



Εικ.4 Δεύτερη φάση της αιχμαλώτισης του στόχου.

2.5 Φάση III

Η τρίτη φάση, το hard capture, είναι η διαδικασία κατά την οποία θα γίνει η ολοκληρωτική αιχμαλώτιση του άνω σταδίου. Στόχος είναι να μηδενιστεί κάθε βαθμός ελευθερίας.



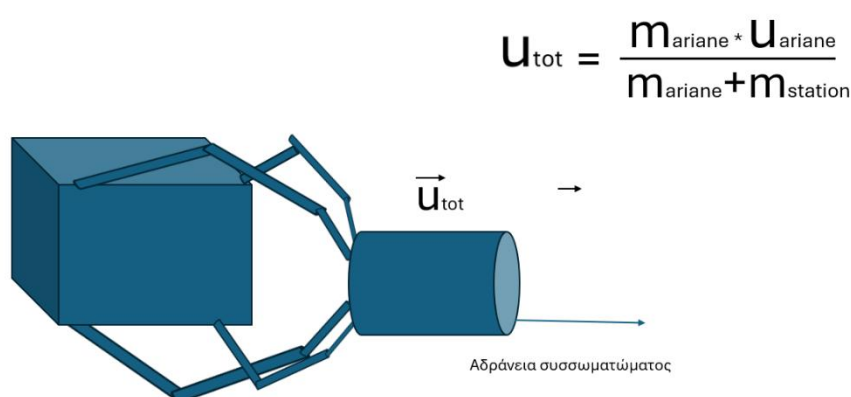
Εικ.5. Η δυναμική του συστήματος του hard capture την στιγμή που αρχίζουν να ασκούνται οι κάθετες δυνάμεις από τα claws. Αναπτύσσονται τριβές μεταξύ των δύο κινούμενων σωμάτων, όπου είναι υπεύθυνες και την αιχμαλώτιση του στόχου. Καθώς ασκούνται οι δύο κάθετες δυνάμεις από τα claws, συμπιέζεται εσωτερικά ο δακτύλιος, δημιουργώντας δύο περίπου ίσες

δυνάμεις συμπίεσης(θεωρώντας ότι ο δακτύλιος δεν είναι τελείως ομοιόμορφος). Η δύναμη επαφής καταργείται όταν οι τριβές εκμηδενίσουν την εναπομένουσα ταχύτητα του σώματος.

Μάλιστα, σε πιο ρεαλιστικό επίπεδο, θα πρέπει να ασκηθούν και δυνάμεις ευθυγράμμισης(alignment forces), από τα 4 claws για να αποφευχθεί ο κίνδυνος συμπίεσης ορισμένων μηχανολογικών μερών από μη ομαλό hard capture.

2.6 Τελική ορμή συστήματος

Στο σύστημα ισχύει η αρχή διατήρησης της ορμής. Δηλαδή η αρχική ορμή του συστήματος θα ισούται με την μάζα του συσσωματώματος επί την τελική ολική ταχύτητα.



Εικ.6. Απεικονίζεται το σύστημα κατά την διαδικασία του hard capture, καθώς και η τελική ολική ταχύτητα του συσσωματώματος.

III. Μανούβρα εισόδου.

Μετά την επιτυχή αιχμαλώτιση, το άνω στάδιο πρέπει να εισέλθει στο εσωτερικό του σταθμού για την περαιτέρω δομική και συστημική του ανάλυση. Για να επιτευχθεί αυτό, οι ρομποτικοί βραχίονες απαιτείται να εκτελέσουν έναν ελιγμό αναπροσανατολισμού, μεταβάλλοντας τη γωνιακή θέση του σώματος κατά 180°. Κατά τη διάρκεια αυτής της δυναμικής διαδικασίας, η δομή των βραχιόνων υποβάλλεται σε εναλλασσόμενα φορτία θλίψης και εφελκυσμού (compression and extension) σε μικρά χρονικά διαστήματα, λόγω των υψηλών ροπών και αδρανειακών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Για τον λόγο αυτό, σε δομικό επίπεδο (structural level), ορίζεται ως **baseline value** ένας **Συντελεστής Ασφαλείας (Safety Factor) SF ≥ 2**. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα των βραχιόνων σχεδιάζεται αρχικά ώστε να είναι τουλάχιστον δύο φορές ισχυρότερο από το απαιτούμενο για τον nominal έλεγχο του άνω σταδίου. Η συντηρητική αυτή τιμή εισάγεται στη δομική ανάλυση (structural analysis) της Pre-Phase A, με απώτερο στόχο τη σταδιακή μείωσή της κοντά στο 1,5 κατά τις επόμενες φάσεις

λεπτομερούς σχεδιασμού, βελτιώνοντας έτσι τον συνολικό προϋπολογισμό μάζας (mass budget) του σκάφους.

3.1. Ορίζοντας αρχικές συνθήκες και προϋποθέσεις για την nominal λειτουργία.

Για τη μαθηματική και δυναμική επαλήθευση του παραπάνω μοντέλου, υιοθετούνται οι ακόλουθες τεχνικές παραδοχές και περιορισμοί:

- 1) Ακαμψία Σημείων Στερέωσης των βραχιόνων : Τα σημεία στα οποία είναι στερεωμένοι οι ρομποτικοί βραχίονες επάνω στον διαστημικό σταθμό θεωρούνται πλήρως άκαμπτα ή παρουσιάζουν αμελητέα ελαστική κάμψη.
- 2) Παραδοχή Στερεού Σώματος : Αγνοούνται οι τοπικές μικροκάμψεις και παραμορφώσεις στη διεπαφή μεταξύ του δακτυλίου (payload ring) και των μηχανισμών αρπάγης (claws), αντιμετωπίζοντας το άνω στάδιο ως ένα ιδανικό, απαραμόρφωτο στερεό σώμα.
- 3) Απόλυτος Συγχρονισμός των Κινητήρων: Θεωρείται ότι υφίσταται πλήρης και απόλυτος χρονικός συγχρονισμός μεταξύ των κινητήρων όλων των βραχιόνων, με μηδενικές χρονικές υστερήσεις.
- 4) Διαχείριση Στροφορμής και Έλεγχος Προσανατολισμού (Attitude Control): **Η πλέον κρίσιμη επιχειρησιακή προϋπόθεση αφορά την ενεργή εισαγωγή εξωτερικής στροφορμής και ροπής από τα συστήματα ελέγχου του ίδιου του σταθμού (AOCS - Attitude and Orbit Control System, μέσω κινητήρων RCS και τροχών αντίδρασης).** Βάσει του τρίτου νόμου του Νεύτωνα (δράση - αντίδραση), η ροπή που εφαρμόζουν οι βραχίονες για να περιστρέψουν το άνω στάδιο μεταφέρεται αυτούσια στη δομή του σταθμού. Συνεπώς, το σύστημα προσανατολισμού του σταθμού πρέπει να παράγει ταυτόχρονα μια αντίθετη και ισοδύναμη ροπή, προκειμένου να αποτραπεί η ανεξέλεγκτη περιστροφή ολόκληρου του διαστημικού σταθμού γύρω από το κέντρο μάζας του.

3.2 Πρώτη Φάση Ελιγμού(από 0 έως 90 μοίρες) : Κινηματική και Δυναμική Ανάλυση.

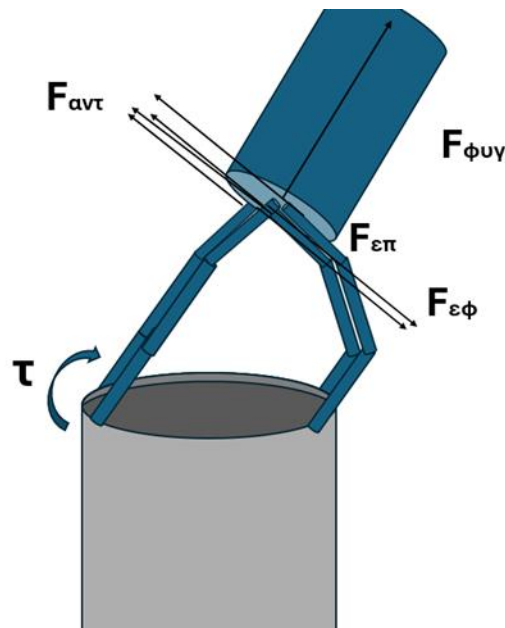
Κατά την πρώτη φάση του ελιγμού αναπροσανατολισμού (εύρος γωνιακής μετατόπισης από 0 έως 90 μοίρες), οι τέσσερις ρομποτικοί βραχίονες χωρίζονται λειτουργικά σε δύο διακριτά ζεύγη: το Ζεύγος 1 (Z_1) και το Ζεύγος 2 (Z_2).

Ζεύγος 1 (Z_1) - Ενεργοί Εκτεινόμενοι Βραχίονες: Οι βραχίονες αυτοί επιμηκύνονται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης, αναλαμβάνοντας την ενεργή καθοδήγηση και προώθηση του άνω σταδίου προς την επιθυμητή τελική του κατεύθυνση.

Ζεύγος 2 (Z_2) - Συμπυκνόμενοι Βραχίονες: Οι βραχίονες αυτοί συμπύσσονται προοδευτικά ακολουθώντας την τροχιά της κίνησης. Οι κινητήρες τους δεν εισάγουν ενεργή ορμή ή κινητική ενέργεια στο άνω στάδιο, αλλά λειτουργούν αποκλειστικά ως στοιχεία δυναμικής στήριξης (structural support).

Οι κινητήρες των βραχιόνων του πρώτου ζεύγους (Z_1) εφαρμόζουν στο σώμα του άνω σταδίου μια γραμμικά αυξανόμενη ροπή στρέψης. Βάσει του τρίτου νόμου του Νεύτωνα (δράση - αντίδραση), το σώμα του στόχου ασκεί ταυτόχρονα μια ίση και αντίθετη ροπή αντίδρασης επάνω στη δομή των βραχιόνων. Δεδομένου ότι το άνω στάδιο παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή ροπή αδράνειας μάζας (mass moment of inertia), η ροπή που απαιτείται να αναπτυχθεί από το ζεύγος Z_1 είναι ιδιαίτερα μεγάλης κλίμακας.

Λόγω της στερεάς γεωμετρικής σύνδεσης μέσω του payload ring, η ροπή που παράγεται από το κυρίαρχο ζεύγος (Z_1) μεταφέρεται αυτούσια και στους μη-εκτεινόμενους βραχίονες Z_2 . Προκειμένου να αποφευχθεί ο λυγισμός ή η δομική κατάρρευση (structural collapse) των βραχιόνων του ζεύγους Z_2 , οι κινητήρες τους υποχρεούνται να εφαρμόσουν μια ελάχιστη ροπή συγκράτησης (holding torque). Αν και η συγκεκριμένη ροπή είναι μηχανικά αναγκαία για τη διατήρηση της ευστάθειας της άρθρωσης, λειτουργεί ως επιπλέον φορτίο για τους κινητήρες, εντείνοντας τα structural stresses.



Εικ. 7. Η πρώτη φάση του ελιγμού.

3.3 Δυναμική συστήματος.

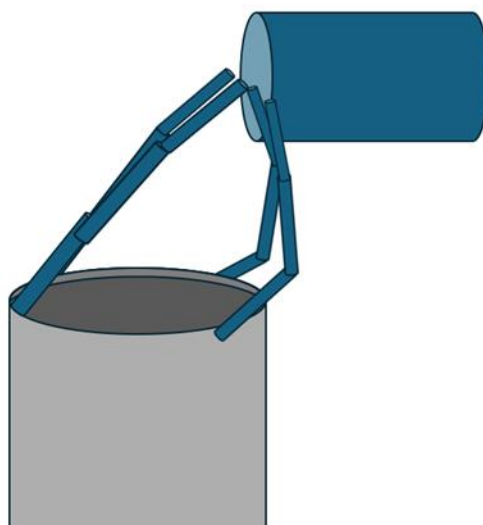
Το πρώτο ζεύγος βραχιόνων, ασκεί μία ,εφαπτόμενη στον κύκλο που διαγράφει το σώμα κατά την κίνηση του, δύναμη, η οποία είναι υπεύθυνη για την κίνηση του σώματος. Η αντίδραση της δύναμης αυτής, είναι μία δύναμη, πάλι εφαπτόμενη στον κύκλο που διαγράφει το σώμα, αλλά αντιστέκεται στην κίνηση του σώματος.

Από την στιγμή που οι κινητήρες στο άλλο ζεύγος, δεν ασκούν κάποια σημαντική ροπή, οι μόνες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό το σύστημα είναι οι δυνάμεις επαφής, οι οποίες κρατάνε την γεωμετρική επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων.

Τέλος, λόγω της αυξανόμενης ροπής που ασκείται στο σύστημα από τους κινητήρες, το άνω στάδιο αποκτά γραμμική ταχύτητα. Άρα για το σύστημα αναφοράς (σύστημα βραχιόνων-σταθμού-πυραύλου), το άνω στάδιο αναπτύσσει μια φυγόκεντρο δύναμη, όπου θα εντείνει τις κάμψεις μεταξύ των μηχανολογικών συστημάτων και, για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει οι κινητήρες να ασκήσουν περισσότερη δύναμη, άρα και ροπή. Η στροφορμή αυξάνεται γραμμικά, οπότε εδώ είναι απαραίτητη η παρέμβαση των guidance systems.

3.4 Στην δεύτερη φάση(ακριβώς 90 μοίρες):

Σε ακριβώς αυτό εδώ το σημείο, μεταίχμιο, η ροπή που θα ασκηθεί από τους κινητήρες θα είναι μηδέν. Η στροφορμή φτάνει στην μέγιστη τιμή της. Οπότε θα πρέπει να δαπανηθεί ανάλογη ηλεκτρική ενέργεια και ποσότητα καυσίμων, για να ακυρώσουν μια ανεξέλεγκτη περιστροφή του σταθμού.



Εικ.8. Το άνω στάδιο βρίσκεται πλέον σε κλίση 90 μοιρών από την αρχική του θέση.

3.4 Τρίτη Φάση Ελιγμού (από 90 έως 180 μοίρες).

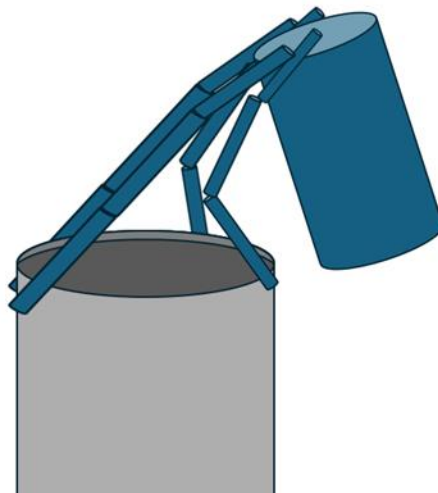
Κατά την τρίτη και τελική φάση του ελιγμού αναπροσανατολισμού (εύρος γωνιακής μετατόπισης από 90 σε 180 μοίρες), το σύστημα εισέρχεται σε φάση ελεγχόμενης απόσβεσης της κινητικής ενέργειας.

Σε αυτή τη φάση, οι αρθρώσεις βάσης του δεύτερου ζεύγους βραχιόνων αντιστρέφουν τη φορά κίνησής τους σε σχέση με τη γεωμετρία της δεύτερης

φάσης. Αντίθετα, οι ακραίες αρθρώσεις (distal joints) —οι οποίες βρίσκονται πλησιέστερα στο payload ring— εκτελούν μια κινηματικά αντίθετη τροχιά από αυτή των αρθρώσεων βάσης, προκειμένου να ευθυγραμμίσουν και να καθοδηγήσουν το άνω στάδιο με ακρίβεια προς την υποδοχή του σταθμού.

Κατά τη διάρκεια αυτού του τελικού ελιγμού, το Ζεύγος Z_2 αναλαμβάνει τον κυρίαρχο ρόλο και συμπαρασύρει το Ζεύγος Z_1 , το οποίο δέχεται πλέον τη μεταφερόμενη ροπή από το δεύτερο ζεύγος. Προκειμένου το σύστημα να ακινητοποιηθεί με ασφάλεια και απόλυτη ακρίβεια στις 180 μοίρες εφαρμόζεται και στα δύο ζεύγη βραχιόνων μια αρνητική ροπή επιβράδυνσης .

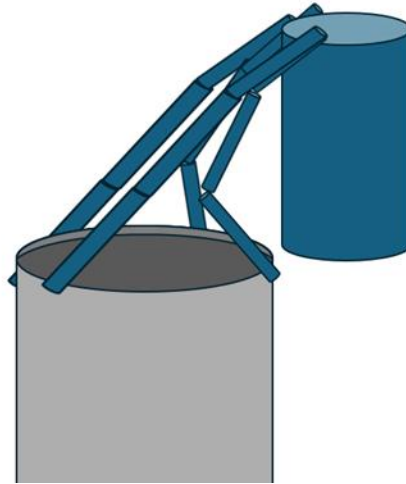
Η ροπή αυτή είναι ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς με τη ροπή επιτάχυνσης που αναπτύχθηκε κατά την πρώτη φάση.



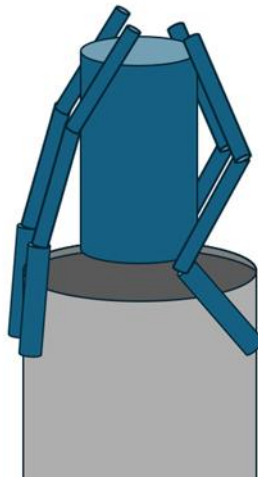
Εικ.9. Η τρίτη φάση της μανούβρας εισόδου

Μέσω αυτής της διαδικασίας, το άνω στάδιο, θα φτάσει στον τελικό στόχο των 180 μοιρών(εικ. 10), εξωτερικά του σταθμού. Για την εσωτερική κατεύθυνση του σταδίου, θα πρέπει το πρώτο ζεύγος να κινηθεί ως προς την αντίθετη κατεύθυνση, παρασύροντας, μαζί του και το άλλο ζεύγος. Παράλληλα, για να επιτευχθεί η κίνηση, θα πρέπει οι τελευταίες αρθρώσεις του βραχίονα πριν το τέλος, να στρίβουν κατά 180 μοίρες(εικ.11).

Αντίθετα, η κίνηση δεν θα πραγματοποιηθεί, γιατί θα συμβεί κρούση μεταξύ των άνω κομματιών των βραχιόνων και του άνω σταδίου.

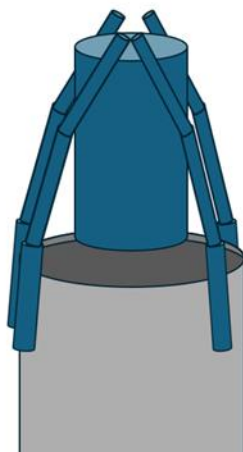


Εικ.10. Το άνω στάδιο έχει διανύσει 180 μοίρες.



Εικ.11. Έχει πραγματοποιηθεί η περιστροφή των κινητήρων κατά 180 μοίρες.

Τέλος, στο δεύτερο ζεύγος βραχιόνων, οι κάτω αρθρώσεις, θα επεκταθούν, ως προς την αντίθετη κατεύθυνση, μειώνοντας την πιθανότητα πρόσκρουσης κατά την απελευθέρωσή του(Εικ.12.).



Εικ. 12. Η τελική θέση του πυραύλου.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Δεν απεικονίζονται τα LAR grabbing systems στις παραπάνω απεικονίσεις.

Το μόνο, που εγγυάται ότι δεν θα καταρρεύσουν οι βραχίονες είναι η τιμή που τοποθετήθηκε ως baselined SF ≥ 2 .

Φάση IV: Είσοδος στον σταθμό.

Η τελική φάση του Conops είναι η είσοδος του άνω σταδίου στον σταθμό για επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της φάσης αυτής, είναι να δοθεί στο άνω στάδιο μία μικρή σταθερή ταχύτητα. Επομένως, actuators, δίπλα στα claws του grabbing system, θα ασκούν μία γραμμικά αυξανόμενη κάθετη δύναμη. Αρχικά, τα actuators θα κάνουν soft touch το payload ring και ενώ παράλληλα τα claws αφήνουν το payload ring με αργό, σταθερό και ελεγχόμενο ρυθμό, η κάθετη δύναμη αυξάνεται, δίνοντας την σταθερή ταχύτητα στο άνω στάδιο.

Ρίσκα.

Τα σημαντικότερα ρίσκα που διακρίθηκαν ήταν τα εξής:

Ρίσκο(ID)	Περιγραφή ρίσκου	Πιθανότητα	Επίπτωση	Επίπεδο ρίσκου		
R1	Λάθος εκτίμηση της ταχύτητας του άνω σταδίου και λάθος εκτίμηση του προσανατολισμού του.	3	5	15		

R2	Ολίσθηση λόγω τριβής μεταξύ LAR Grippers και payload ring.	2	4	8		
R3	Εμπλοκή των μηχανολογικών συστημάτων του βραχίονα.	4	3	12		
R4	Υπερφόρτωση των κινητήρων και των βραχιόνων.	4	3	12		
R5	Λάθος συγχρονισμός μεταξύ των βραχιόνων.	4	3	12		

Ανάλυση ρίσκων και προτεινόμενες λύσεις.

R1:

Περιγραφή: Η μη ομαλή ή ασύμμετρη απελευθέρωση του άνω σταδίου από τον μεταφορέα ενδέχεται να προκαλέσει απρόβλεπτη δυναμική συμπεριφορά και τροχιακή απόκλιση του σώματος. Εάν η μεταβολή αυτή ανιχνευθεί έγκαιρα, ενεργοποιείται άμεσα το πρωτόκολλο εγκατάλειψης της διαδικασίας (Abort Mission). Σε αντίθετη περίπτωση, θα προκληθεί σφοδρή κρούση μεταξύ δύο σωμάτων υψηλής αδράνειας με σχετικές ταχύτητες που υπερβαίνουν τα όρια σχεδιασμού (Design Limits), γεγονός που μπορεί να πυροδοτήσει το φαινόμενο Kessler (Kessler Syndrome) σε ευρεία κλίμακα.

Προτεινόμενη Λύση (Mitigation): Εγκατάσταση πολυφασματικών αισθητηριακών συστημάτων μεγάλης εμβέλειας. Με τον τρόπο αυτό, ακόμη και σε περίπτωση μηχανικής αστοχίας του φορέα, η πιθανότητα απρόβλεπτης πρόσκρουσης μειώνεται κατά δύο βαθμίδες. Παράλληλα, εάν διαπιστωθεί μη ελέγξιμη κινητική κατάσταση του άνω σταδίου, εκτελείται αυτόματος ελιγμός αποφυγής σύγκρουσης (Collision Avoidance Manoeuvre - CAM) με μεταβολή της θέσης του σταθμού στον χώρο, μειώνοντας την πιθανότητα καταστροφικής επίπτωσης κατά τέσσερις βαθμίδες. **Το τελικό επίπεδο ρίσκου περιορίζεται στο 2.**

R2:

Περιγραφή: Η πιθανότητα ολίσθησης κατά τη φάση της σύλληψης βαθμολογείται αρχικά με δείκτη 2. Για την εξάλειψη του φαινομένου, απαιτείται η ομαλή και πλήρης απόσβεση της κινητικής ενέργειας του άνω σταδίου από τους

αποσβεστήρες . Η ελαχιστοποίηση της σχετικής κινητικής ενέργειας είναι κρίσιμη για τον ακριβή προσανατολισμό του άνω σταδίου ως προς τον σταθμό, καθώς η σταθερότητα της συγκράτησης εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρική παγίδευση (geometric capture) που επιτυγχάνει το LAR Gripper.

Προτεινόμενη Λύση (Mitigation): Πρόβλεψη επιπλέον αποθέματος καυσίμου για την εκτέλεση μικροδιορθώσεων τροχιάς (orbit trim manoeuvres) σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι η αιχμαλώτιση θα πραγματοποιηθεί στο βέλτιστο γεωμετρικό σημείο. Ταυτόχρονα, διατίθεται επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια για την εντατική λειτουργία των γυροσκοπίων/τροχών αντίδρασης (Reaction Wheels). Τέλος, οι αποσβεστήρες σχεδιάζονται με αυξημένο ελάχιστο Συντελεστή Ασφαλείας $SF \geq 2$

R3:

Περιγραφή: Οι συνεχείς εσωτερικές κάμψεις και οι αναπτυσσόμενες τάσεις που προκαλούνται από τις διαδοχικές κρούσεις επαφής μεταξύ των ρομποτικών βραχιόνων και του άνω σταδίου, ενδέχεται να οδηγήσουν σε δομική κοπή και μηχανική εμπλοκή (jamming) των εσωτερικών συστημάτων μετάδοσης κίνησης. Η τρέχουσα έλλειψη εξειδικευμένης βιβλιογραφικής ή πειραματικής μελέτης των εσωτερικών μηχανισμών δυσχεραίνει τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας τους.

Προτεινόμενη Λύση (Mitigation): Διεξαγωγή ενδελεχούς ανάλυσης των βραχιόνων κατά την διάρκεια του μελλοντικού σχεδιασμού και διεξαγωγή δυναμικών προσομοιώσεων (Fatigue Analysis). Ο σχεδιασμός των αρθρώσεων με χρήση προηγμένων κραμάτων (π.χ. Τιτανίου ή Nitinol) θα αποτρέψει την πλαστική παραμόρφωση και θα εξαλείψει τον κίνδυνο εμπλοκής.

R4:

Περιγραφή: Οι έντονες δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των απαιτητικών ελιγμών (manoeuvres) εισόδου, κατά την τρίτη φάση και λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων, ενδέχεται να προκαλέσουν υπέρβαση των ορίων αντοχής των υλικών, οδηγώντας σε δομική κατάρρευση (structural collapse) των βραχιόνων και των υποσυστημάτων τους.

Προτεινόμενη Λύση (Mitigation): Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, επιλέχθηκε η εφαρμογή ενός αυστηρού, υψηλού Συντελεστή Ασφαλείας $SF \geq 2$ κατά τον σχεδιασμό των βραχιόνων και των κινητήρων, θωρακίζοντας το σύστημα έναντι των μέγιστων αναμενόμενων φορτίων επιτάχυνσης.

R5:

Περιγραφή: Τυχόν απόκλιση ή σφάλμα χρονισμού (asynchronization) κατά την ταυτόχρονη λειτουργία των ρομποτικών βραχιόνων μπορεί να οδηγήσει σε μη προβλεπόμενο διαμοιρασμό και συγκέντρωση των ροπών. Η ασυμμετρία αυτή εντείνει τις μηχανικές κάμψεις τόσο στους ίδιους τους βραχίονες, στους κινητήρες τους όσο και στην κεντρική δομή του payload ring του Ariane 5.

Προτεινόμενη Λύση (Mitigation): Ανάπτυξη και εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με την τοποθέτηση αισθητήρων δύναμης/ροπής (Force/Torque sensors) στις αρθρώσεις των βραχιόνων. Το σύστημα θα εξισορροπεί δυναμικά τα εφαρμοζόμενα φορτία, εκμηδενίζοντας τις ασύμμετρες καταπονήσεις.

Συμπερασματικά:

Η τροχιακή αιχμαλώτιση άνω σταδίων πυραύλων (In-Orbit Capture) αποτελεί μια επιχείρηση εξαιρετικά υψηλής διακινδύνευσης, η οποία απαιτεί απόλυτο συγχρονισμό και παρουσιάζει μηδενική ανοχή σε σφάλματα (zero-margin operation). Για την ακριβέστερη αποτίμηση των κινδύνων και τη διασφάλιση της βιωσιμότητας του σχεδιασμού, κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή λεπτομερούς δομικής ανάλυσης (Structural Analysis) μέσω λογισμικών CAD (όπως το Fusion 360), καθώς και η εκτέλεση δυναμικών προσομοιώσεων υπό κλίμακα με ορθά γεωμετρικά και αδρανειακά μεγέθη, που θα πλησιάζουν αυτά σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη συλλογή έγκυρων πειραματικών δεδομένων υψηλής πιστότητας (high-fidelity data), καθώς και ο συνεχής προσδιορισμός του κέντρου μάζας (Center of Mass) του συνδυασμένου συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ο οποίος είναι καθοριστικός για τον ακριβή υπολογισμό των αναπτυσσόμενων ροπών και της μεταβολής της στροφορμής (angular momentum). Τέλος, θα πρέπει να δημιουργηθούν νέα concepts of operations σε περίπτωση απόκλισης από το ονομαστικό (nominal) πλάνο.

Trade off studies

Για την αποφυγή της μανούβρας εισόδου, είχαμε σχεδιάσει το σύστημα, να εκτελεί την αιχμαλώτιση, ενώ παράλληλα, το άνω στάδιο εισέρχεται εσωτερικά του σταθμού. Ο λόγος που σταμάτησε η ανάπτυξη της ιδέας, ήταν ο λόγος ότι, δεν μπορεί να απορριφθεί το απαιτούμενο μέρος της κινητικής ενέργειας και το άνω στάδιο θα ολισθούσε από τα LAR grippers, πραγματοποιώντας κρούση μεταξύ του σταθμού και του άνω σταδίου.

Αναφορές

[1] The Capturing of Space Debris with a Spaceborne Multi fingered Gripper.

[2] Ο προθάλαμος εισόδου αναλύεται στο ConOps.

[3] <https://www.esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2023/kozlowski.pdf>

Η τεχνολογία βρίσκεται σε επίπεδο **TRL 4**.