



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Προσέγγιση και Σύλληψη Στόχου από Διαστημικό Ρομποτικό Σύστημα Αρ. Προγράμματος 681052

Υπ. Διδάκτορας: Ιωσήφ Σ. Παρασκευάς
Επιβλέπων: Ευάγγελος Παπαδόπουλος



Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Περιεχόμενα

- Διαστημικά Ρομπότ
- Το πρόβλημα – Κίνητρο
- Χρήση του Κρουστικού Κέντρου
- Μοντελοποίηση Κρούσης Συστημάτων
Κυνηγού - Στόχου
- Μοντέλο Κρούσης
- Διαστημικός Προσομοιωτής
- Δημοσιεύσεις - Διπλωματικές
- Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία



Διαστημικά Ρομπότ

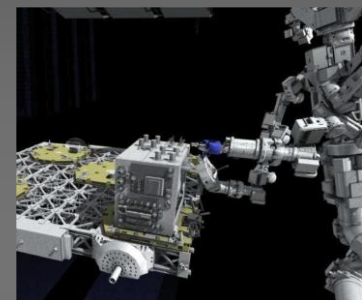
- Χρησιμοποιούνται σε **αποστολές Τροχιακών Υπηρεσιών** (On Orbit Servicing – OSS)
 - Συλληψη χαλασμένου δορυφόρου
 - Σύλληψη σκουπιδιών
 - Επισκευή δορυφόρων
- Κατασκευάζονται και δοκιμάζονται **στην γη**
- Άρα εξομοιωτές και προσομοιωτές καθώς και μελέτη του ελέγχου τους **είναι απαραίτητη**



Το Πρόβλημα - Κίνητρο

- Η προσέγγιση και σύλληψη ενός διαστημικού Στόχου συμπεριλαμβάνει **κρούσεις**:
 - Η σύλληψη/ πρόσδεση **δεν είναι τέλεια**
 - Η απουσία σημείων αρπαγής αυξάνει τα **ρίσκα**
 - Μη συνεργαζόμενοι στόχοι σημαίνει **άγνωστες δυνάμεις**

- Τα ερωτήματα λοιπόν είναι πως μπορούμε:
 - **Να μειώσουμε τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις** κι έτσι την πιθανότητα **αστοχίας**;
 - **Μειώσουμε την τάση απομάκρυνσης** μεταξύ Κυνηγού και Στόχου άρα **να χρειαστούμε λιγότερο χρόνο και καύσιμα**;
 - **Να εκμεταλλευτούμε** την κρούση για την σύλληψη;



Το Κρουστικό Κέντρο (ΚΚ)

- Το **Κρουστικό Κέντρο (ΚΚ)** είναι γνωστό στην μηχανική με κύρια χρήση
 - Αθλητικό Εξοπλισμό (π.χ. baseball)
 - Εργαλεία Χειρός (π.χ. Σφυριά)
- Συνήθως μια στρατηγική κρούσης απαιτεί **λεπτομερή σχεδιασμό και έλεγχο μετά την κρούση.**
- Με την χρήση του ΚΚ:
 - Ο σχεδιασμός διευκολύνεται
 - Μειώνονται οι δυνάμεις αντίδρασης και μπορούμε να έχουμε πιο αποτελεσματικούς ελεγκτές
- Άρα χρειάζονται **οδηγίες χρήσης του ΚΚ**



ΚΚ στις 2 διαστάσεις

- **Υποθέσεις:** Κρούση στερεών σωμάτων, μεγάλες δυνάμεις για μικρό χρονικό διάστημα, οι αρθρώσεις μοιάζουν πακτωμένες στιγμιαία

- Ράβδος σε **ελεύθερη άρθρωση**

- Η ώθηση στις αντιδράσεις:

$$\tilde{W}_N^2 = W_N^2 / W_{F_{imp}}^2 = \left[1 + \left(C_{ID}^2 - 2 C_{ID} \right) \sin^2 f \right]$$

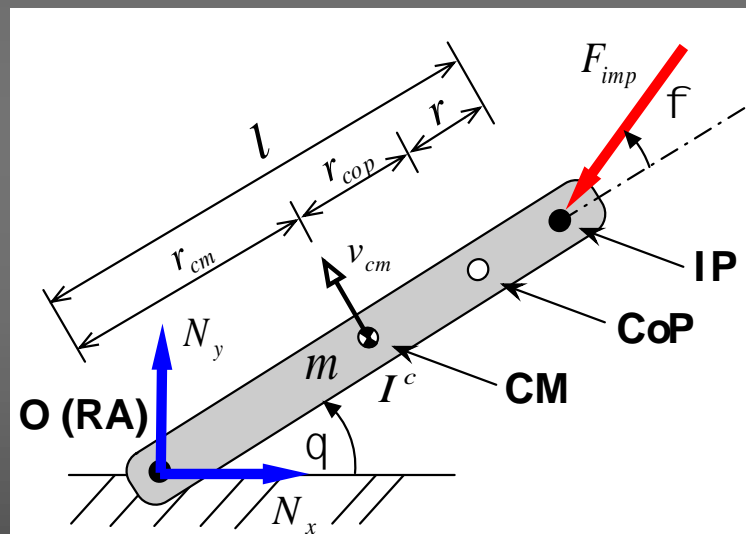
- ο **Συντ. Σχεδιασμού Κρούσης (ΣΣΚ)**

$$C_{ID} = l \times r_{cm} \times m \times (I^o)^{-1}$$

- Η ώθηση **μηδενίζεται** μόνο αν

$$\tilde{W}_N = 0 \quad b = 1 \quad f = \pm \pi/2 \quad \text{and} \quad C_{ID} = 1$$

$$\text{το οποίο δίνει} \quad r_{cop} = I^c \times (r_{cm} \times m)^{-1}$$



ΚΚ στις 3 διαστάσεις (1)

- Έστω **ελεύθερη σφαιρική άρθρωση**
- Οι αντιδράσεις είναι διαν. άθροισμα

$$\Omega_N = \Omega_{N\perp} + \Omega_{N\parallel} \text{ σε σχέση με } l_{imp}$$

- Υπολογισμός αντιδράσεων από

$${}^a I^o \cdot {}^a \omega = \left[{}^a l_{imp} \times (m \cdot {}^a \omega \times {}^a r_{cm} - {}^a \Omega_N) \right]$$

- Πρακτικά:

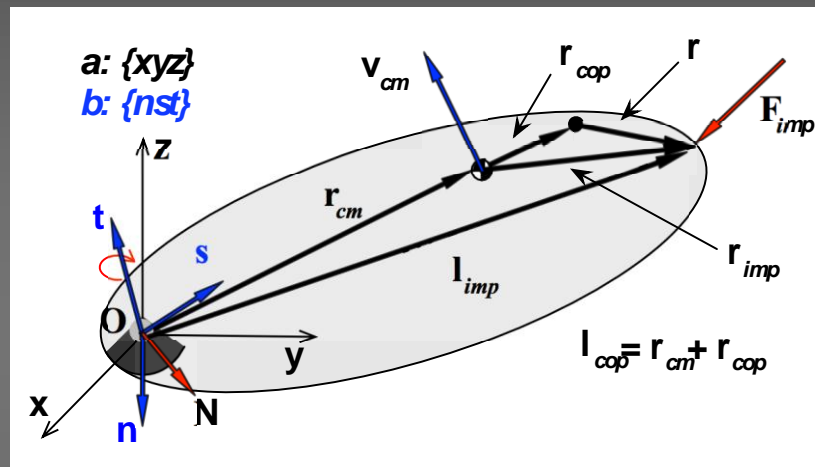
- **Παράλληλη συνιστώσα** του $l_{imp} \rightarrow$ καμία ροπή ως προς O \rightarrow Δεν μηδενίζεται
- **Κάθετη συνιστώσα** του $l_{imp} \rightarrow$ μηδενίζεται \rightarrow οδηγεί στο

$${}^a I^o \cdot {}^a \omega = m {}^a r_{cm} \times {}^a \omega \times {}^a l_{cop}$$

- Κατά την κρούση θεωρούμε **στιγμαίο άξονα περιστροφής** \hat{t}

- Τελικά...

$$W_t \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^b I_{nt}^o + m \square r_{cm,t} \square_{cop,n} \\ {}^b I_{st}^o + m \square r_{cm,t} \square_{cop,s} \\ {}^b I_{tt}^o - m \left(r_{cm,s} \square_{cop,s} + r_{cm,n} \square_{cop,n} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$



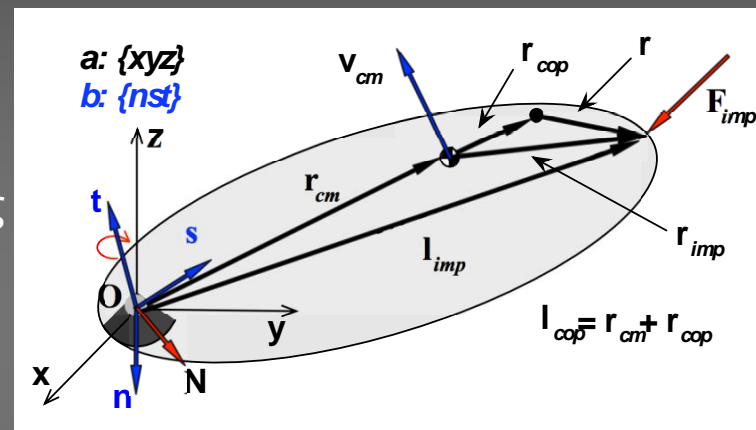
ΚΚ στις 3 διαστάσεις (2)

- W_t δεν μηδενίζεται
- Το διάνυσμα όμως μηδενίζεται αν
 - a. $\hat{\mathbf{t}}$ είναι κύριος άξονας αδράνειας του σώματος
 - b. Υπάρχει συμμετρία ως προς το επίπεδο ns
 - c. Καμία παράλληλη συνιστώσα ως προς \mathbf{l}_{imp}
 - d. Η κρούση συμβαίνει σε σημείο που ισχύει

$${}^b \mathbf{r}_{cm} \times {}^b \mathbf{r}_{cop} = {}^b I_{tt}^c \times m^{-1}$$

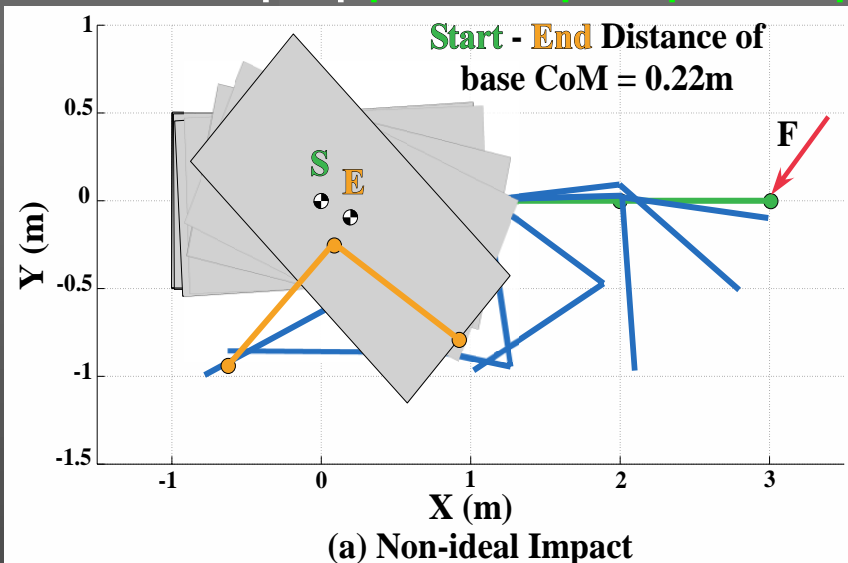
Άρα: Σημείο Κρούσης, Κέντρο Περιστροφής και Κέντρο μάζας πρέπει να είναι **συνευθειακά**.

- Αν ισχύουν μόνο τα c & d \rightarrow **μικραίνουν οι αντιδράσεις αλλά δεν μηδενίζονται**
- Βρίσκεται αντίστοιχη εξίσωση με **Newton-Euler Algorithm** που μπορεί να χρησιμοποιηθεί **σε ελεγκτή**

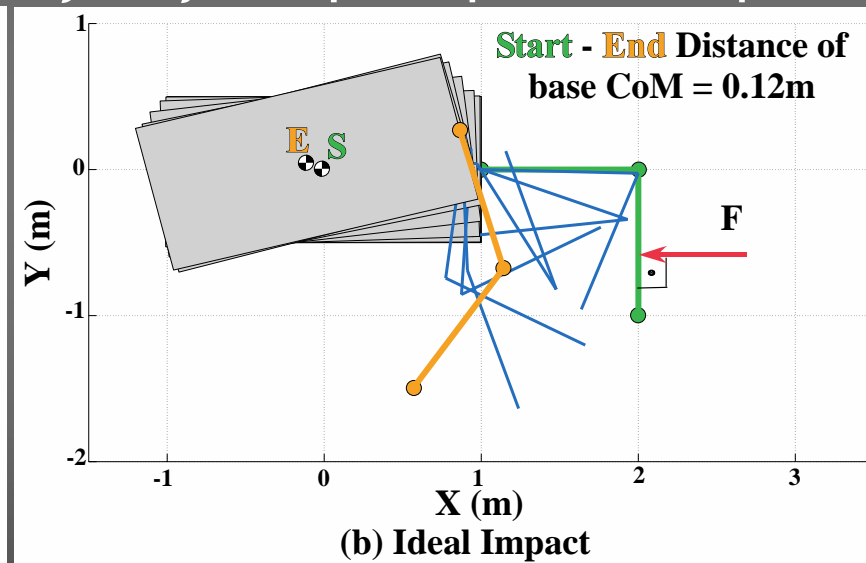


ΚΚ – Προσομοίωση (1)

- Σύστημα χωρίς προωθητήρες με **ελεύθερες αρθρώσεις**
- Η κίνηση **μετά την Κρούση** εξετάζεται για την ίδια διάρκεια



Μη ιδανικό: Τυχαία
Διαμόρφωση

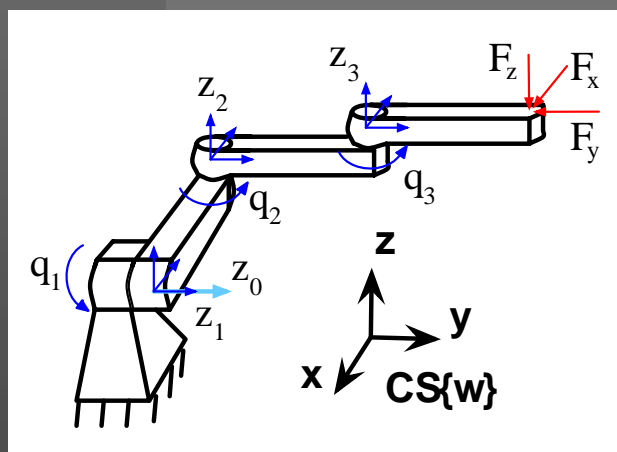


Ιδανικό: Διαμόρφωση με
χρήση του ΚΚ

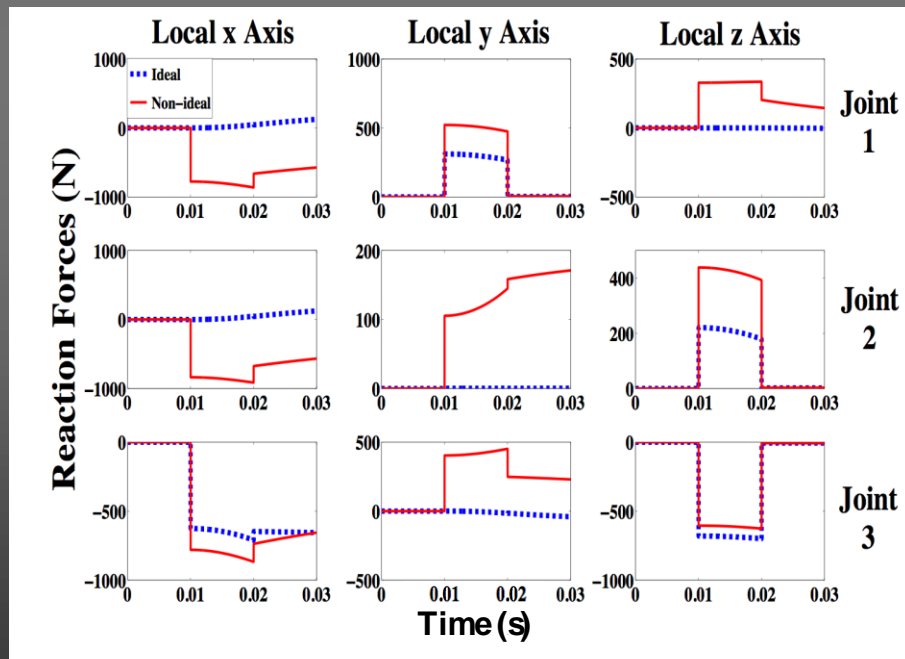
- Κατά την ιδανική κρούση η απόσταση **μειώνεται**

ΚΚ – Προσομοίωση (2)

- 3R ρομπότ τύπου PUMA με **ελεύθερες αρθρώσεις**.
- Πακτωμένο σε μεγάλο σώμα, π.χ. ISS



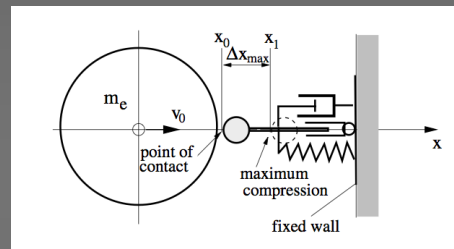
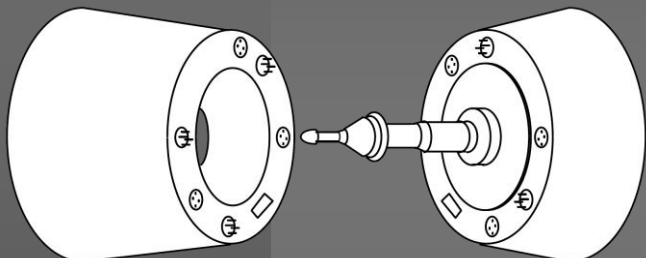
Absolute Forces in N	1 st Case (0°, 0°, 0°) (1, 1, 1)	2 nd Case (0°, 0°, 0°) (1, C, C)	3 rd Case (0°, 0°, 90°) (1, 1, C)	4 th Case (0°, 0°, 90°) (C, C, C)
Joint 1	1583	1390	419	310
Joint 2	1520	1337	355	220
Joint 3	1307	1260	838	997



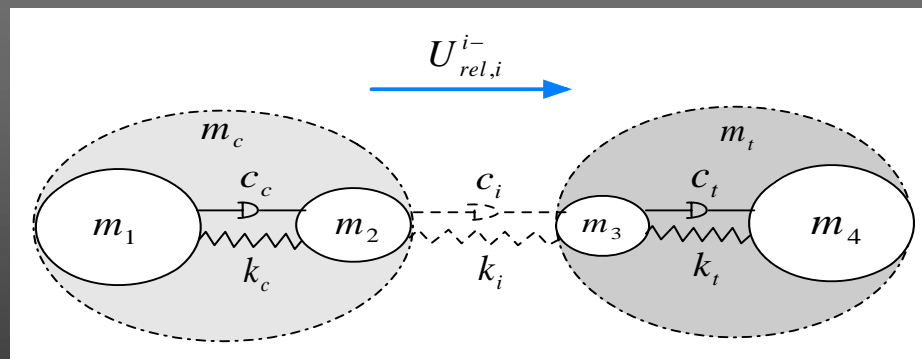
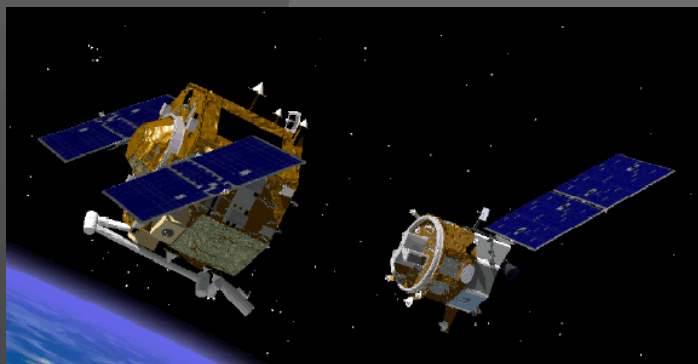
- ΚΚ → **μείωση αντιδράσεων**
- Οι κάθετοι σύνδεσμοι **μειώνουν τις αντιδράσεις στην βάση**.

Κρούση Συστημάτων (ΚΣ)

- Η κλασική αντιμετώπιση **δεν επαρκεί** ιδιαίτερα όταν τα συστήματα έχουν **παραπλήσιες αδράνειες**



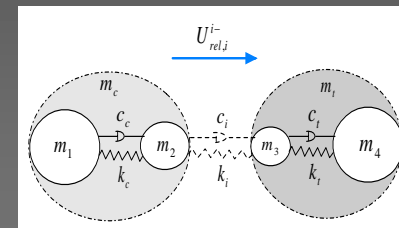
- Αποδεικνύεται πιο **ρεαλιστικό** ένα γενικευμένο σύστημα 4 σωμάτων



- Ακόμα κι έτσι όμως η επίλυση **δεν είναι προφανής!!!**

ΚΣ – Θεωρία

- Γίνεται μια «μίξη» θεωρίας κρούσης στερεών σωμάτων και με κρούσης με συγκεντρωμένες παραμέτρους
- Η σχετική ταχύτητα μετά την κρούση αποδεικνύεται



$$U_{rel,s}^{i+} = 1 - \frac{(1 + e^*) m_{i,ef}}{m_{i,ef}} U_{rel,s}^{i-} - \frac{(1 + e^*) m_{i,ef}}{m_{i,ef}} dU_{rel}^{i-} \quad m_{i,ef} = \frac{m_2 \times m_3}{m_2 + m_3} \quad m_{i,ef} = \frac{m_c \times m_t}{m_c + m_t}$$

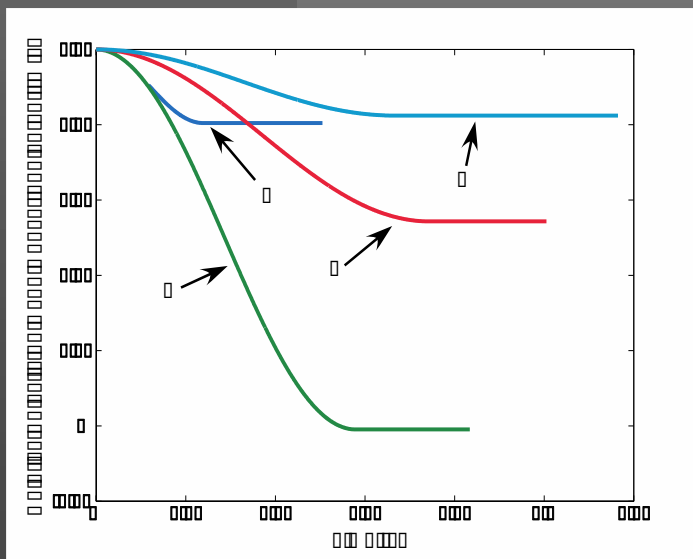
- Ορίζουμε τον λόγο των ενεργών μαζών

$$e_l = \frac{m_{i,ef}}{m_{i,ef}} = \frac{\left(\left(\frac{1}{c} + 1 \right) \times \frac{1}{i} + \left(\frac{1}{t} + 1 \right) \right)}{\left(\frac{1}{i} + 1 \right) \times \left(\frac{1}{c} \times + 1 \right) \times \left(\frac{1}{t} + 1 \right)}$$

$$\frac{1}{i} = \frac{m_2}{m_3} \quad \frac{1}{c} = \frac{m_1}{m_2} \quad \frac{1}{t} = \frac{m_4}{m_3}$$

ΚΣ – Προσομοιώσεις

- Έγιναν προσομοιώσεις θεωρώντας τις μάζες ξεχωριστές ενωμένες με συγκεντρωμένες παραμέτρους
- Η κρούση περιγράφηκε με μοντέλο Kelvin-Voigt
- Καμία θεώρηση κρούσης στερεών σωμάτων στην προσομοίωση!



Property	Example A	Example B	Example C	Example D
m_1	17	10	5	100
m_2	2	10	50	20
m_3	1.5	10	10	10
m_4	15	10	100	200
Contact Stiffness	1000	1000	1000	1000
Chaser Stiffness	15000	15000	15000	15000
Target Stiffness	200	200	200	200
Initial Rel. Velocity	0.05	0.05	0.05	0.05
Final Rel. Velocity (Eq. 33)	0.0403	0	0.02728	0.0413
Final Rel. Velocity (simulation)	0.0402	-0.000476	0.02715	0.0412
Error	0.0001	0.000476	0.00013	0.0001

Νέο Μοντέλο Κρούσης (NМК)

- Πως μοντελοποιούμε κρούσεις;
 - Στερεομηχανικές εξισώσεις (γρήγορες αλλά όχι ακριβείς)
 - FEM (ακριβείς αλλά όχι για χρήση σε πραγματικό χρόνο)
 - Εξισώσεις Συγκεντρωμένων Στοιχείων (κάτι ενδιάμεσο...)

- Νέο Μοντέλο Κρούσης

– Δύναμη

$$F_g^i(y_g, \dot{y}_g) = \begin{cases} F_c^i = (\lambda_c^i \cdot k_g + b_g \cdot \dot{y}_g)(y_g - y_e^{i-1})^n, & \dot{y}_g \geq 0 \\ F_r^i = (\lambda_r^i \cdot k_g + b_g \cdot \dot{y}_g)(y_g - y_e^i)^n, & \dot{y}_g < 0 \end{cases}$$

– Τελική συμπίεση

$$y_e^j = y_{c, \max}^j \times \left(1 - \sqrt[n]{l_c^i / l_r^i}\right) + y_e^{j-1} \times \left(\sqrt[n]{l_c^i / l_r^i}\right)$$

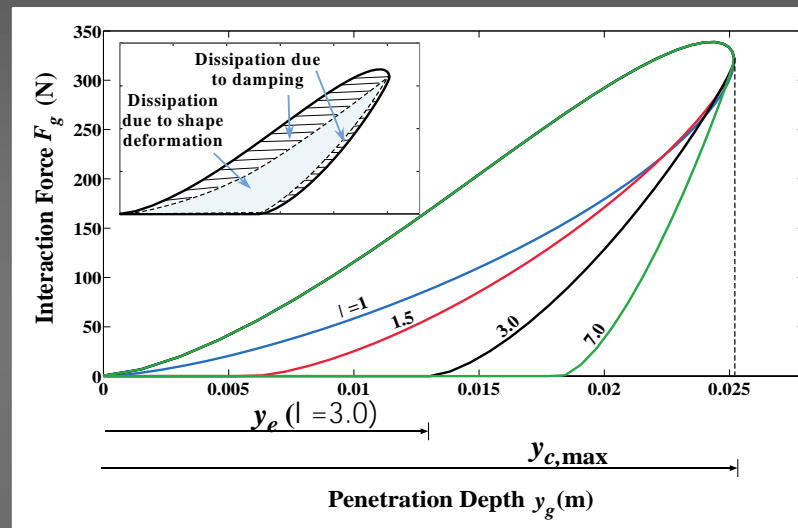
NMK – Ανάλυση Μοντέλου

- Συντελεστής Μόνιμης Παραμόρφωσης

$$I_c^i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ I_r^{i-1}, & i > 1, \quad i \in \mathbb{N} \end{cases}$$

$$I_r^i = I_r^i(\text{ulika}, \text{tacuththa}, i), \quad i \in \mathbb{N}$$

- + Επιτρέπει την μοντελοποίηση της επανασυμπίεσης
- + Με κατάλληλη επιλογή του λ περιγραφή διαφόρων σωμάτων/εδαφών $I_r^i = 1 + \lambda \alpha(i) \times (1 - e^{-i \times b(i)})$, $i \in \mathbb{N}$
- + Γενικό μοντέλο κρούσης, χρήση όχι μόνο με HC
- **Stiff** αριθμητικό μοντέλο



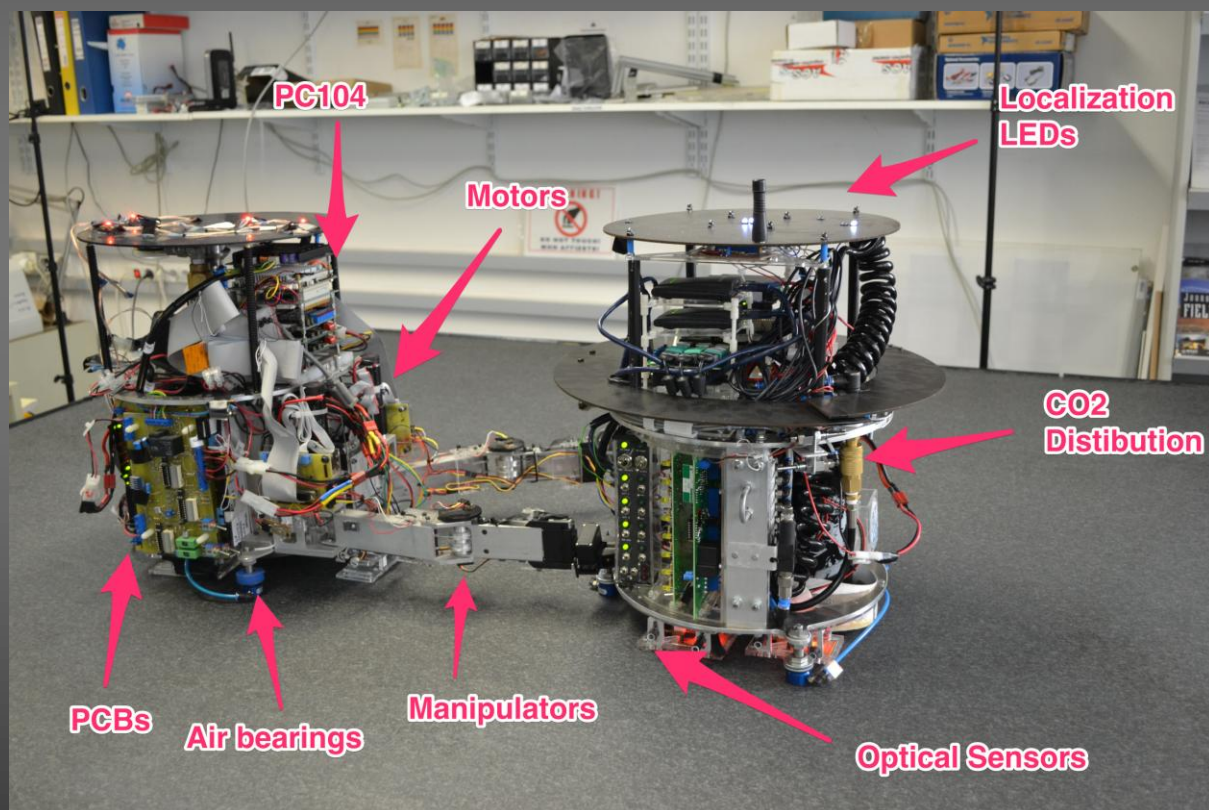
Διαστημικός Προσομοιωτής (1)

- **Βάση Αιώρησης**
 - Γρανίτης Μεγάλης επιπεδότητας
 $\approx 4.0 \text{ t}$
 - Επιφάνεια 4 m^2
 - Τραχύτητα $< 5 \mu\text{m}$
 - Ρυθμιζόμενο ύψος
- **Περιφερειακός Εξοπλισμός**
 - Υπολογιστές Ελέγχου
 - Κάμερα καταγραφής κίνησης
 - Σύστημα εύρεσης θέσης
Phasespace



Διαστημικός Προσομοιωτής (2)

- Αιώρηση μέσω CO_2
- Πρόωση με CO_2
- Περιστροφή και με σφόνδυλο αντίδρασης
- Υπολογιστικά και ενεργειακά αυτόνομα
- Σχεδόν ολοκληρωμένα



Συμπεράσματα

- Η διαδικασία Προσέγγισης, Σύλληψης και Πρόσδεσης είναι **εξαιρετικά κρίσιμη για την επιτυχία**.
- Οι δυνάμεις αντίδρασης **μπορούν να ελαχιστοποιηθούν** με την χρήση του ΚΚ.
- Η κρούση μεταξύ ΣΠΣ είναι ένα φαινόμενο που μπορεί **να περιγραφεί με απλοποιήσεις**.
- Μπορούμε να βρούμε την **σχ. ταχύτητα μετά την κρούση**.
- Παρουσιάστηκε **νέο Μοντέλο Κρούσης** με βισκοπλαστικά χαρακτηριστικά.
- Χρήση του νέου μοντέλου και σε μη διαστημικά θέματα
- Διαστημικός Προσομοιωτής **σχεδόν ολοκληρωμένος**

Μελλοντική Εργασία

- Ολοκλήρωση του ελεγκτή που εκμεταλλεύεται το ΚΚ.
- Ενσωμάτωση λεπτομερέστερης μοντελοποίησης του non-backdrivability.
- Περαιτέρω μελέτη των ΣΠΣ και εύρεση επίδρασης του stiffness. Χρήση του για δοκιμή πρόσδεσης.
- Ολοκλήρωση του Διαστημικού Εξομοιωτή μας και πειράματα.
- Ειδικά πειράματα κρούσης για εμφάθυνση στο Νέο Μοντέλο Κρούσης.

Δημοσιεύσεις - Διπλωματικές

- **6 δημοσιεύσεις** (5 παγκ. συνέδρια, 1 κεφ. βιβλίου).

1. Papadopoulos, E., Paraskevas, I., Rekleitis, G., Flessa T., "The NTUA Space Robotics Emulator: Design and Experiments," International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '11): Workshop on Space Robotics Simulation September 26, 2011, San Fransisco, CA, USA.
2. Papadopoulos, E., Paraskevas, I., and Flessa, Th., "Miniaturization and Micro/ Nanotechnology in Space Robotics," in NanoRobotics: Current Approaches and Techniques, Mavroidis C. and Ferreira A. (Editors), Springer, 2012
3. Flessa, T., Paraskevas, I., and Papadopoulos, E., "Localization and Fuel Management Techniques Using the NTUA Space Servicer Emulator System," 11th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, (i-SAIRAS), 4-6 September 2012, Turin, Italy.
4. Paraskevas, I. and Papadopoulos, E., "On the Use of the Center of Percussion for Space Manipulators during Impacts," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '13), May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany.
5. Machairas, K., Andreou, S., Paraskevas, I. and Papadopoulos, E., "Extending the NTUA Space Robot Emulator for Validating Complex On-Orbit Servicing Tasks," 12th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation, (ASTRA '13), ESA, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, May 15-17, 2013.
6. Kalgreadis, A., Paraskevas, I., Flessa, T. and Papadopoulos, E., "Localization of the NTUA Emulator Space Robot Using a Discrete Extended Kalman Filter, Data Fusion & Feedback Delay Compensation," 12th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation, (ASTRA '13), ESA, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, May 15-17, 2013.

- **1 δημοσίευση** υπό κρίση για παγκ. Συνέδριο

- **2 δημοσιεύσεις** υπό συγγραφή για περιοδικά

- **2 διπλωματικές και 1 μεταπτυχιακή** ολοκληρωμένες

- **3 διπλωματικές** σε εξέλιξη

Χρηματοδότηση Έρευνας

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ερωτήσεις;



Ευχαριστώ!