

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΕΡ-ΕΠΕΝΕΡΓΟΥΜΕΝΗΣ ΤΡΙΓΩΝΙΚΗΣ ΠΛΩΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Κώστας Βλάχος, και Ευάγγελος Παπαδόπουλος

Σχολή Μηχ. Μηχ. Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυναμική μοντελοποίηση και η αυτόνομη σταθεροποίηση μιας πλωτής, κινητής πλατφόρμας στο οριζόντιο επίπεδο. Οι απαιτούμενες δυνάμεις και ροπές ελέγχου κλειστού βρόγχου παρέχονται από τρεις περιστρεφόμενες αντλίες-τζετ νερού, τοποθετημένες στο κάτω μέρος τριών, μερικής βυθισμένων κυλίνδρων στις γωνίες της πλατφόρμας. Με αυτήν τη διαμόρφωση, η πλατφόρμα καθίσταται υπερ-επενεργούμενη, δηλ., ο αριθμός των ανεξάρτητων εισόδων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας (BE). Συνεπώς, σχεδιάζουμε ένα κατάλληλο αλγόριθμο κατανομής των απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών στις αντλίες ώστε ο σκοπός του ελέγχου να επιτυγχάνεται χωρίς να παραβιάζονται οι δυνατότητες αυτών.

Λέξεις κλειδιά: Υπερ-επενεργούμενα ρομπότ, πλωτή πλατφόρμα, έλεγχος.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλωτές πλατφόρμες χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία πετρελαίου, ως πλατφόρμες επισκευών σε ναυπηγεία και αλλού (Wilson, 2003). Η συμπεριφορά τους περιγράφεται από μη γραμμικές εξισώσεις κυρίως λόγω των έντονων υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον (Hawary, 2001), και επομένως, μη γραμμικοί ελεγκτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο τους. Επιπροσθέτως, οι πλωτές πλατφόρμες είναι συνήθως υπερ-επενεργούμενες, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο ένα σύστημα βέλτιστης κατανομής των δυνάμεων και ροπών ελέγχου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνιστούν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, το οποίο δύσκολα λύνεται, ειδικά σε συστήματα πραγματικού χρόνου και με περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες, (Fossen, 2006). Παρ' όλα αυτά, έχουν προταθεί κάποιες επαναληπτικές λύσεις βελτιστοποίησης, (Bodson, 2002), όπως και σχήματα βέλτιστης κατανομής δυνάμεων πρόωσης, (Lynch, 1999). Οι λύσεις αυτές είναι πολύπλοκες και αναπτύχθηκαν για κατασκευές διαφορετικής κινηματικής και δυναμικής συμπεριφοράς.

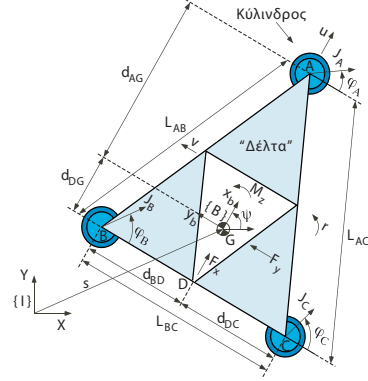
Η πλατφόρμα Βερενίκη, Σχ. 1α, που θα χρησιμοποιηθεί ως πλωτή βάση εξυπηρέτησης του υποθαλάσσιου τηλεσκοπίου Νετρίνων Νέστωρ, πρέπει να διατηρεί τη θέση και τον προσανατολισμό της μέσα σε μια προκαθορισμένη περιοχή. Προβλήματα προέρχονται από περιβαλλοντικές διαταραχές, από τη μη πλήρη γνώση του υδροδυναμικού μοντέλου και των επενεργητών καθώς και την ανακρίβεια που προέρχεται από την ανατροφοδότηση των μεταβλητών κατάστασης (θέση, προσανατολισμός και ταχύτητα). Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων και σχεδιαστικών προκλήσεων, υιοθετούνται μη γραμμικά μοντέλα τόσο για την ανάλυση της υδροδυναμικής όσο και για το σχεδιασμό του ελέγχου κλειστού βρόγχου. Ένα αξιόπιστο σύστημα κατανομής των δυνάμεων και ροπών ελέγχου επίσης σχεδιάζεται και παρουσιάζεται. Τμήμα της σχετικής έρευνας έχει δημοσιευθεί στο (Vlachos, 2010).

2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Η πλατφόρμα αποτελείται από μια κατασκευή σχήματος “Δ” πάνω σε τρεις διπλούς κυλίνδρους (ομοαξονικούς και διαφορετικής διαμέτρου). Τη δυνατότητα κίνησης τη δίνουν οι αντλίες-τζετ νερού στο κάτω μέρος των κυλίνδρων και είναι πλήρως βυθισμένες. Μια μηχανή diesel κινεί κάθε αντλία, ενώ ένας ηλεκτρουδραυλικός κινητήρας περιστρέφει το τζετ παρέχοντας κατευθυνόμενη πρόωση.



α)



β)

Σχήμα 1. α) Η πλατφόρμα Βερενίκη υπό κατασκευή. β) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Η κυρίως κατασκευή της πλατφόρμας έχει το σχήμα ενός ισοσκελούς τριγώνου, Σχ. 1β. Το κέντρο μάζας (ΚΜ) της κατασκευής συμπίπτει με το σημείο G , κατά μήκος του άξονα συμμετρίας σε απόσταση d_{AG} από την κορυφή A . Για να περιγραφεί η κινηματική στο επίπεδο, χρησιμοποιούνται δύο συστήματα συντεταγμένων, το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (ΣΣ) $\{I\}$ και το σωματόδετο ΣΣ $\{B\}$. Όπως φαίνεται, η αρχή του $\{B\}$ συμπίπτει με το ΚΜ. Ο άξονας x_b συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας της πλατφόρμας, ο y_b δείχνει αριστερά και ο z_b προς τα πάνω (εκτός του επιπέδου του σχήματος). Οι εξισώσεις κινηματικής για την επίπεδη κίνηση είναι:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{R}\mathbf{v}, \text{ όπου, } \dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}]^T, \mathbf{v} = [u, v, r]^T, \mathbf{R} = [c\psi \ -s\psi \ 0, \ s\psi \ c\psi \ 0, \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (1)$$

με $s^\bullet = \sin(\bullet)$, $c^\bullet = \cos(\bullet)$. x και y παριστάνουν τις αδρανειακές συνιστώσες του ΚΜ και ψ τον προσανατολισμό του $\{B\}$ ως προς το $\{I\}$. u και v είναι η πρόσθια και η πλάγια ταχύτητα εκφρασμένες στο $\{B\}$ και r είναι η γωνιακή ταχύτητα της πλατφόρμας.

3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Οι υδροδυνάμεις είναι το αποτέλεσμα της κίνησης των κυλίνδρων στο νερό: η δύναμη που εμφανίζεται ως πρόσθετη μάζα, λόγω της επιτάχυνσης του νερού που περιβάλλει τον επιταχυνόμενο κύλινδρο, είναι γραμμική συνάρτηση της επιτάχυνσης του κυλίνδρου ενώ η δύναμη της αντίστασης του νερού είναι τετραγωνική συνάρτηση της ταχύτητας του κυλίνδρου. Αυτές οι δυνάμεις μοντελοποιούνται σύμφωνα με την Εξίσωση του Morison, (Hoerner, 1965), και σαν παράδειγμα, καταγράφουμε την ασκούμενη δύναμη στον κύλινδρο του σημείου A του τριγώνου, εκφρασμένης στο $\{B\}$:

$$\mathbf{f}_A = -C_A \pi \rho [R_{uc}^2 (H_{uc} - h) + R_{lc}^2 H_{lc}]^B \mathbf{a}_A - C_D \rho [R_{uc} (H_{uc} - h) + R_{lc} H_{lc}]^B \mathbf{v}_A \quad (2)$$

όπου C_A είναι ο αδιάστατος συντελεστής πρόσθετης μάζας και C_D είναι ο αδιάστατος συντελεστής του νερού. ρ είναι η πυκνότητα του νερού, H_{uc}/H_{lc} είναι το ύψος του κυλίνδρου με την μικρή/μεγάλη διάμετρο και h είναι το ύψος του κυλίνδρου έξω από το νερό. Οι αντίστοιχες διαμέτροι είναι R_{uc} και R_{lc} . Οι δυνάμεις στον κύλινδρο είναι ισοδύναμες με μια ίση δύναμη και μια ροπή που δρουν στο ΚΜ.

Οι αντλίες τζετ νερού έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν κατευθυνόμενη πρόωση και συνεπώς μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό ελέγχου. Τα μέτρα των προώσεων συμβολίζονται με J_A , J_B και J_C , ενώ τα φ_A , φ_B και φ_C συμβολίζουν τις αντίστοιχες μεταβλητές περιστροφής των τζετ, Σχ. 1β. Οι προώσεις αυτής της διαμόρφωσης παρέχουν την είσοδο ελέγχου τ_c σύμφωνα με τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$\tau_c = \mathbf{B}\mathbf{J}, \quad \text{όπου} \quad \tau_c = [F_x, F_y, M_z]^T, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -d_{AG} & -d_{DC} & d_{DG} & d_{DC} & d_{DG} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = [J_A s\varphi_A, J_A c\varphi_A, J_B s\varphi_B, J_B c\varphi_B, J_C s\varphi_C, J_C c\varphi_C]^T$$

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω υπολογισμούς εξάγουμε τις εξισώσεις επίπεδης κίνησης της πλατφόρμας εκφρασμένες στο $\{B\}$:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f} + \tau_c, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - 3m_A & 0 & 0 \\ 0 & m - 3m_A & (2d_{DG} - d_{AG})m_A \\ 0 & (2d_{DG} - d_{AG})m_A & I_{zz} - (d_{AG}^2 + 2d_{BD}^2 + 2d_{DG}^2)m_A \end{bmatrix} \quad (4)$$

όπου \mathbf{M} είναι ο πίνακας μάζας του στερεού σώματος και των πρόσθετων μαζών, με m_A τον συντελεστή επιτάχυνσης στην (2) και I_{zz} τη μαζική ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα z_b . Επίσης, $\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$, όπου \mathbf{f} είναι μη γραμμική συνάρτηση των ταχυτήτων του συστήματος. Το διάνυσμα τ_c είναι η είσοδος ελέγχου στο σύστημα για την οποία σχεδιάζεται ο νόμος ελέγχου κλειστού βρόχου, δες Κεφ. 5.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Λόγω υδροδυναμικών χαρακτηριστικών και πρακτικών περιορισμών, το σχήμα και το μέγεθος της πλατφόρμας ήταν δεδομένο. Ωστόσο, η δυνατότητα διατύπωσης κανόνων σχεδιασμού μιας πλωτής πλατφόρμας με το δεδομένο σχήμα και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επενέργησης αποτελεί ενδιαφέρον ζήτημα έρευνας. Για την μελέτη του θέματος, χρησιμοποιούμε τον πίνακα \mathbf{B} διότι εξαρτάται αποκλειστικά από την γεωμετρία της πλατφόρμας. Για να μην επηρεάζεται η ανάλυση μας από τις διαφορετικές μονάδες, διαιρούμε την (3) με $d_V = (L_{AC} + L_{BC})/2$.

$$\tau_c^* = \mathbf{B}^* \mathbf{J}, \quad \text{όπου} \quad \mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -d_{AG}/d_V & -d_{DC}/d_V & d_{DG}/d_V & d_{DC}/d_V & d_{DG}/d_V \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\tau_c^* = [F_x, F_y, (M_z/d_V)]^T$$

Ο πίνακας \mathbf{B}^* , συνεχίζει να εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία της πλατφόρμας και απεικονίζει τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{J} στα στοιχεία δύναμης του τ_c^* . Στη συνέχεια, εξετάζουμε τον αριθμό κατάστασής του, k , δηλ. τον λόγο μεταξύ της μεγαλύτερης και μικρότερης ιδιόμορφης τιμής του. Επιλέγουμε να δουλέψουμε με τον k , διότι η τιμή του είναι ένα μέτρο της σχέσης μεταξύ των τιμών ελέγχου και της κατανομής των δυνάμεων πρόωσης στα τζετ. Ο στόχος μας είναι να έχουμε ένα όσο το δυνατόν μικρότερο k , έτσι ώστε να κατανέμονται οι δυνάμεις πρόωσης των τζετ όσο πιο ισοδύναμα γίνεται. Οι ιδιόμορφες τιμές του πίνακα \mathbf{B}^* είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_2 = \sqrt{3}, \quad \sigma_{1,3} = (\sqrt{d_{AG}^2 + 2d_{DC}^2 + 2d_{DG}^2 + 3d_V^2 \pm \sqrt{K}}) / d_V \sqrt{2}, \quad \text{όπου} \quad (6)$$

$$K = -8(3d_{DC}^2 + (d_{AG} + d_{DG})^2)d_V^2 + (d_{AG}^2 + 2(d_{DC}^2 + d_{DG}^2) + 3d_V^2)^2 \quad (7)$$

Η παρατήρηση των ιδιόμορφων τιμών, έδειξε ότι ισχύει πάντα η ανισότητα $\sigma_1 \geq \sigma_2 > \sigma_3$. Επομένως ο αριθμός κατάστασης k του πίνακα \mathbf{B}^* είναι ίσος με σ_1/σ_3 . Λεπτομερέστερη εξέταση του αριθμού k σε λογικά όρια ($L_{AB} = 45\text{m}$, $20\text{m} < L_{BC} < 70\text{m}$), έδειξε ότι παίρνει την ελάχιστη τιμή του όταν, ο λόγος $r = d_{AG}/(d_{AG} + d_{DG})$ είναι ίσος με $2/3$. Αν και όπως αναφέρθηκε το σχήμα και το μέγεθος της πλατφόρμας ήταν δεδομένο, ο λόγος r είναι πολύ κοντά στο βέλτιστο.

5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Το πρακτικό αντικείμενο του ελέγχου είναι η σταθεροποίηση της πλατφόρμας σε μία περιοχή γύρω από τη θέση “μηδέν”, με όρια θέσης $\pm 5\text{m}$ και προσανατολισμού $\pm 10^\circ$. Και αυτό, γιατί η μη πλήρης γνώση κυρίως των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, οι ισχυρές περιβαλλοντικές διαταραχές (άνεμος, θαλάσσια ρεύματα) και η ανακρίβεια των ενδείξεων από τους αισθητήρες, τείνουν να απωθούν την πλατφόρμα εκτός του επιθυμητού σημείου. Η είσοδος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι το διάνυσμα $\boldsymbol{\tau}_c$ και είναι η συνισταμένη των δυνάμεων και ροπών στο ΚΜ από τα τζετ. Ο αλγόριθμος κατανομής των απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών στα τζετ παρουσιάζεται παρακάτω. Από την (4) έχουμε $d\mathbf{v}/dt = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f} + \boldsymbol{\tau}_c)$ που οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\dot{u} = f_{u1} + f_{u2}F_x, \quad \dot{v} = f_{v1} + f_{v2}M_z + f_{v3}F_y, \quad \dot{r} = f_{r1} + f_{r2}F_y + f_{r3}M_z \quad (8)$$

όπου τα διάφορα σύμβολα f είναι συναρτήσεις των μεταβλητών κατάστασης. Παρατηρούμε τις συζεύξεις των εισόδων στην (8), αλλά οι αντίστοιχοι συντελεστές f_{v2} και f_{r2} έχουν πολύ μικρό μέτρο, δικαιολογώντας τη θεώρηση των γινομένων $f_{v2}M_z$ και $f_{r2}F_y$ ως μικρές διαταραχές οι οποίες είναι φραγμένες και μπορούν ν’ αντισταθμιστούν από έναν σθεναρό νόμο ελέγχου κλειστού βρόχου. Ο όρος ανατροφοδότησης είναι:

$$\mathbf{f}_{fb} = [\ddot{x}_R, \ddot{y}_R, \ddot{\psi}_R]^T - \mathbf{K}_D[\dot{x} - \dot{x}_R, \dot{y} - \dot{y}_R, \dot{\psi} - \dot{\psi}_R]^T - \mathbf{K}_P[x - x_R, y - y_R, \psi - \psi_R]^T - \mathbf{K}_I \int_0^t [x - x_R, y - y_R, \psi - \psi_R]^T dt \quad (9)$$

και με $\mathbf{K}_D = \text{diag}\{k_{dx}, k_{dy}, k_{d\psi}\}$, $\mathbf{K}_P = \text{diag}\{k_{px}, k_{py}, k_{p\psi}\}$ και $\mathbf{K}_I = \text{diag}\{k_{ix}, k_{iy}, k_{i\psi}\}$ θετικά ορισμένοι πίνακες κερδών, έχουμε το ακόλουθο σύστημα ελέγχου (παράδειγμα για x).

$$\ddot{x} - \ddot{x}_R = -k_{dx}(\dot{x} - \dot{x}_R) - k_{px}(x - x_R) - k_{ix} \int_0^t (x - x_R) dt + \varepsilon_x \quad (10)$$

Ο δείκτης “R” συμβολίζει μια επιθυμητή μεταβλητή και ε_x είναι πολύ μικρή, φραγμένη διαταραχή. Τελικά, η είσοδος ελέγχου κλειστού βρόχου περιγράφεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{M}\mathbf{R}^T(\mathbf{f}_{fb} - \mathbf{R}\mathbf{v}) - \mathbf{f} \quad (11)$$

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος κατανομής των απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών. Ο σκοπός είναι η αποδοτική κατανομή αυτών των δυνάμεων ελέγχου ώστε να επιτυγχάνεται το αντικείμενο του ελέγχου χωρίς να παραβιάζονται οι δυνατότητες των επενεργητών. Από την (3) προκύπτει ότι $\mathbf{J} = \mathbf{B}^+\boldsymbol{\tau}_c$ όπου \mathbf{B}^+ είναι ο ψευδοαντίστροφος του πίνακα \mathbf{B} . Άρα, οι επιθυμητές τιμές για τα μέτρα των προώσεων από τα τζετ και τον προσανατολισμό τους ως προς το όχημα είναι:

$$J_{q,des} = \sqrt{(J_q \sin \varphi_q)^2 + (J_q \cos \varphi_q)^2}, \quad \varphi_{q,des} = a \tan 2(J_q \sin \varphi_q, J_q \cos \varphi_q) \quad (12)$$

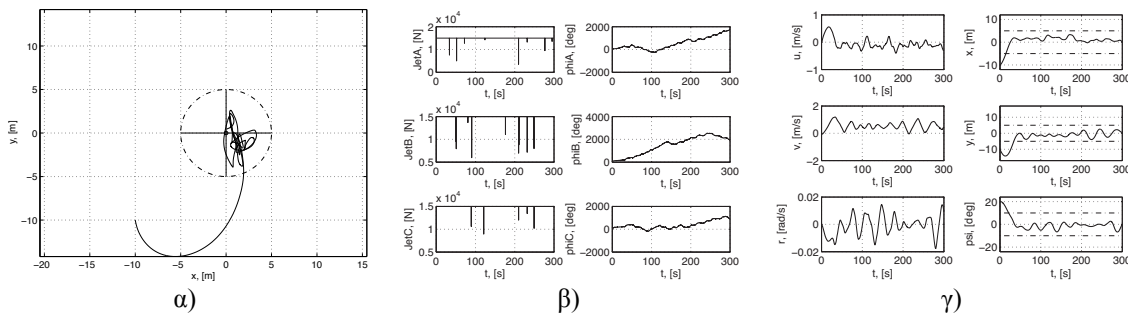
όπου $q = A, B, C$. Όμως στην πραγματικότητα οι επιθυμητές τιμές από την (12), δεν αποδίδονται αμέσως από το σύστημα λόγω της δυναμικής των επενεργητών. Επομένως, κατά τις προσομοιώσεις έχει τεθεί δυναμική συστήματος πρώτου βαθμού με καθυστέρηση $t_s = 1$ s στην περιστροφή των τζετ, $d\varphi_A/dt = (1/t_s)(\varphi_{A,des} - \varphi_A)$ όπου $\varphi_{A,des}$ είναι η επιθυμητή γωνία. Επίσης, υποθέτουμε στις προσομοιώσεις ότι οι προώσεις είναι άμεσα διαθέσιμες αλλά έχουν μέγιστη τιμή 15kN.

6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει με τα εξής δεδομένα και σταθερές τιμές (μεγέθη στο σύστημα SI): $L_{AB} = 45$, $L_{BC} = 35$, $m = 425 \times 10^3$, $R_{uc} = 2.2$, $H_{uc} = 6.5$, $R_{lc} = 3.5$, $H_{lc} = 3.0$, κέρδη $k_{dx,y,\psi} = 2.2$, $k_{px,y,\psi} = 0.3$, και $k_{ix,y,\psi} = 0.002$, αρχικές συνθήκες για τις γωνίες των τζετ $\varphi_{A,B,C,0} = 0$, αρχικές συνθήκες κίνησης της πλατφόρμας $u_0 = 0.1$, $v_0 = 0$, $r_0 = 0.01$, $x_0 = 10.0$, $y_0 = -10.0$, και $\psi_0 = -20^\circ$. Στις προσομοιώσεις έχουν συμπεριληφθεί μοντέλα θαλάσσιου ρεύματος (1kn, 280°) και ανέμου (10kn \approx 3 beaufort, 280°), (Fossen, 1994). Οι δυνάμεις, X_w , Y_w , και ροπές, T_w , που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα λόγω του ανέμου περιγράφονται από τις εξισώσεις:

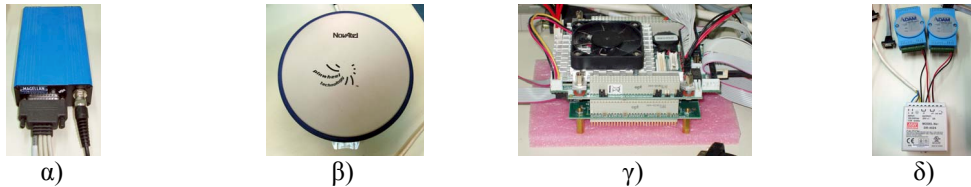
$$X_w = 0.5C_X(\gamma_R)\rho_w V_R^2 A_T, \quad Y_w = 0.5C_Y(\gamma_R)\rho_w V_R^2 A_L, \quad T_w = 0.5C_T(\gamma_R)\rho_w V_R^2 A_L L \quad (13)$$

όπου C_X και C_Y είναι οι συντελεστές δύναμης, και C_T ο συντελεστής ροπής. Αυτοί εξαρτώνται από την γωνία γ_R , που σχηματίζεται μεταξύ των προσανατολισμών του ανέμου και της πλατφόρμας. ρ_w είναι η πυκνότητα του αέρα, A_T και A_L είναι οι προβολές στον προσανατολισμό του ανέμου της εγκάρσιας και πλευρικής επιφάνειας αντίστοιχα, και L είναι το συνολικό μήκος της πλατφόρμας. V_R είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου σε ναυτικούς κόμβους. Επιπλέον, επιβάλλουμε θόρυβο μετρήσεων από τους αισθητήρες θέσης (GPS). Στο Σχ. 2 βλέπουμε ότι η πλατφόρμα σταθεροποιείται μέσα στα απαιτούμενα όρια παρόντων περιβαλλοντικών διαταραχών, θορύβου μετρήσεων και περιορισμών των επενεργητών.



Σχήμα 2. α) Δυναμική τοποθέτηση πλατφόρμας. β) Μέτρα και προσανατολισμοί των προώσεων των τζετ. γ) Γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες, θέση και προσανατολισμός της πλατφόρμας.

Για την υλοποίηση του συστήματος, χρησιμοποιούμε τρεις δέκτες GPS και δύο κεραιές, βλέπε Σχ. 3α, και 3β αντίστοιχα, τα οποία μας δίνουν τη θέση και τον προσανατολισμό της πλατφόρμας. Δύο RTK GPS συνδέονται με τις κεραιές και μας δίνουν τον προσανατολισμό. Η θέση παρέχεται από το τρίτο GPS, το οποίο είναι επίσης συνδεδεμένο με μία από τις δύο κεραιές. Η θέση έχει ακρίβεια ± 1 m, και ο προσανατολισμός $\pm 0.2^\circ/\delta$, όπου δ είναι η απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών (≥ 1 m). Τα σήματα από τα GPS μεταφέρονται στον υπολογιστή ελέγχου μέσω θυρών RS232. Ο υπολογιστής ελέγχου αποτελείται από δύο πλακέτες PC104, την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) και μια πλακέτα με τέσσερις θύρες RS232, βλέπε Σχ. 3γ.



Σχήμα 3. α) Δέκτης GPS. β) Κεραία. γ) Υπολογιστής ελέγχου. δ) Αναλογικές εξόδους και τροφοδοσία.

Ο υπολογιστής ελέγχου «τρέχει» σε λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου Xenomai. Ο αλγόριθμος ελέγχου και κατανομής δυνάμεων προγραμματίστηκε σε γλώσσα C. Το λογισμικό έχει εισόδους την θέση και τον προσανατολισμό της πλατφόρμας, και εξόδους τις επιθυμητές δυνάμεις και γωνίες πρόωσης. Οι τελευταίες ελέγχουν τις αναλογικές εξόδους, βλέπε Σχ. 3δ, οι οποίες οδηγούν τα τζετ.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία παρουσίασε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου, αυτόνομης δυναμικής τοποθέτησης μιας τριγωνικής πλωτής πλατφόρμας. Η πλατφόρμα είναι υπερ-επενεργούμενη, δηλ., ο αριθμός των ανεξάρτητων εισόδων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ΒΕ. Συνεπώς, σχεδιάσαμε ένα κατάλληλο αλγόριθμο κατανομής των απαιτούμενων δυνάμεων και ροπών στις αντλίες ώστε ο έλεγχος να επιτυγχάνεται χωρίς να παραβιάζονται οι δυνατότητες αυτών. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην ψευδο-αντιστροφή του πίνακα μετασχηματισμού που σχετίζει τις δυνάμεις ελέγχου με τις δυνάμεις πρόωσης των τζετ. Επιπροσθέτως, διατυπώσαμε κανόνες σχεδιασμού μιας τριγωνικής πλατφόρμας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό κατάστασης (condition number) του πίνακα μετασχηματισμού που σχετίζει τις δυνάμεις ελέγχου με τις δυνάμεις πρόωσης των τζετ. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, σε σύγκριση με άλλους επαναληπτικούς και πολύπλοκους, είναι γρήγορος, αξιόπιστος και υπολογιστικά ελαφρύς. Τέλος, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα προσομοιώσεων, με περιβαλλοντικές διαταραχές, για την παρατήρηση της απόδοσης του ελέγχου.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bodson, M., “Evaluation of Optimization Methods for Control Allocation,” *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 25, pp. 703–711, 2002.

Fossen, T. I., “Guidance and Control of Ocean Vehicles,” John Wiley & Sons, 1994.

Fossen, T. I., and Johansen, T. A., “A Survey of Control Allocation Methods for Ships and Underwater Vehicles,” in *Proc. Mediterranean Control Conference 2006*, 2006.

Hawary, F. E. (Ed.), “The Ocean Engineering Handbook,” Boca Raton, Florida, CRC Press, 2001.

Hoerner, S. F., “Fluid-Dynamic Drag,” Hoerner Publications, 1965.

Lynch, K. M., “Controllability of a Planar Body with Unilateral Thrusters,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, pp. 1206–1211, 1999.

Vlachos, K., and Papadopoulos, E., “Control Design and Allocation of an Over-Actuated Triangular Floating Platform,” *2010 IEEE International Conf. on Robotics and Automation (ICRA’10)*, Anchorage, Alaska, May 3-8, 2010, pp. 3739-3744.

Wilson, J. F., “Dynamics of Offshore Structures,” New Jersey, John Wiley and Sons, 2003.