

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ



Διπλωματική εργασία

Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης για μελέτη επιφανειών

Βασίλης Γκιώνης nm13069

Επιβλέπων καθηγητής: Γ Τζαμπίρας

Εξεταστική επιτροπή:

-Γ. Τζαμπίρας

-Γ. Ζαραφωνίτης

-Γ. Γρηγορόπουλος

Μάρτιος 2019

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη.....	4
1: Εισαγωγή.....	5
1.1: Είδη αισθητήρων.....	5
1.2: Επιλογή αισθητήρα.....	8
2: Κατασκευή του αισθητήρα.....	28
3: Λειτουργία και σύνδεση μηχανής CNC.....	33
3.1: Σύνδεση του Mach3 με τον αισθητήρα.....	34
3.1.1: CNC breakout board.....	34
3.1.2: Σήμα εξόδου.....	35
3.2: Χρήση του Mach3 για digitizing.....	36
3.3: Κώδικες.....	38
4: Διαδικασία μέτρησης σημείων.....	42
4.1: 1 ^ο μοντέλο: Ιστιοσανίδα.....	44
4.2: 2 ^ο μοντέλο: Βάρκα.....	49
4.3: 3 ^ο μοντέλο: Λεπτόγραμμα σκάφος.....	52
5: Διαδικασία σχεδίασης επιφανειών.....	55
5.1: 1ο μοντέλο: Ιστιοσανίδα.....	56
5.2: 2 ^ο μοντέλο: Βάρκα.....	61
5.3: 3 ^ο μοντέλο: Λεπτόγραμμα σκάφος.....	65
6: Περιγραφή και μελέτη σφαλμάτων μέτρησης.....	69
6.1: 1 ^ο είδος σφάλματος: Ανικανότητα προσέγγισης επιφάνειας.....	69
6.2: 2 ^ο είδος σφάλματος: Διάμετρος της σφαίρας.....	70
6.3: 3 ^ο είδος σφάλματος: Περιστροφή της βελόνας.....	71
6.3.1: Μελέτη σφάλματος αισθητήρα σε συνάρτηση με γωνία και ταχύτητα.....	71
6.4: Σφάλματα μηχανής.....	76
7: Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία.....	80

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η κατασκευή ενός αισθητήρα επαφής ο οποίος θα συνδεθεί σε μια μηχανή CNC της οποίας οι κινήσεις ελέγχονται μέσω του προγράμματος Mach 3 για τη μέτρηση των συντεταγμένων διαφόρων τεμαχίων. Ένα σύστημα CNC (Computer Numerical Control) χρησιμοποιεί συνήθως ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD/CAM, το εργαλείο, κινητήρες που ελέγχουν τις κινήσεις του στο χώρο, έναν ελεγκτή, και τις συνδέσεις μεταξύ τους. Τα εργαλεία που μπορούν να τοποθετηθούν μπορεί να είναι κοπτικά, τρυπάνια, laser, και άλλα. Η κίνησή τους ελέγχεται από κώδικες που εκτελούνται από το πρόγραμμα Mach 3. Αυτός ο αισθητήρας αρχικά κατασκευάστηκε από υλικά που μπορούν εύκολα να διατεθούν, και τοποθετήθηκε στη μηχανή CNC ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Στο Mach3 δημιουργήθηκε κώδικας ο οποίος αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της κίνησης του αισθητήρα. Η μέτρηση σημείων μέσω της λήψης σήματος κάθε φορά που, στην περίπτωση του αισθητήρα επαφής, ο αισθητήρας βρίσκεται σε επαφή με το υπό μελέτη τεμάχιο. Υπάρχει και η δυνατότητα εύρεση ακμών στο τεμάχιο επειδή η κίνηση της άκρης του αισθητήρα δε γίνεται μόνο στο διαμήκη άξονα, αλλά και γύρω από αυτόν. Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία, το τεμάχιο μπορεί να περαστεί στον υπολογιστή σε ψηφιακή μορφή και να εισαχθεί σε πρόγραμμα σχεδίασης. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Rhinoceros 3D. Εκεί γίνεται η σχεδίαση νομέων, ισάλων, και τελικά επιφανειών με δεδομένα τα σημεία που λήφθηκαν από τις μετρήσεις του αισθητήρα. Στο τέλος περιγράφονται τα είδη σφαλμάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, και γίνονται κάποιες προτάσεις αποφυγής αυτών των σφαλμάτων. Ένα από αυτά τα σφάλματα μελετήθηκε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια για να βρεθεί η απόκλιση των μετρήσεων που παίρνει ο αισθητήρας από τις πραγματικές συντεταγμένες του σημείου, με μεταβαλλόμενα μεγέθη τη γωνία της μετρούμενης επιφάνειας και την ταχύτητα κίνησης του αισθητήρα ως προς τον άξονα z.

1: Εισαγωγή

Η μέτρηση των συντεταγμένων (x,y,z) ενός συνόλου σημείων πραγματοποιείται από παλιά με τη χρήση αισθητήρων. Οι πρώτες μηχανές μέτρησης σημείων κατασκευάστηκαν στη δεκαετία του 1950, οι οποίες είχαν τη δυνατότητα εύρεσης της θέσης ενός σημείου σε 2 άξονες. Μια δεκαετία αργότερα έγινε δυνατή η μέτρηση σημείων στο χώρο, ενώ τη δεκαετία του 1970 ξεκίνησε να πραγματοποιείται μέτρηση που ελέγχεται από υπολογιστή. Οι πρώτοι αισθητήρες που κατασκευάστηκαν ήταν μηχανικοί, και είχαν αρκετά απλή μορφή. Επίσης, δεν ήταν δυνατή η αυτόματη κίνησή τους στο χώρο, αλλά γινόταν χειροκίνητα. Συνήθως αποτελούνταν από έναν άξονα του οποίου το ένα άκρο τοποθετούνταν σε μια ειδική υποδοχή της μηχανής, ενώ το άλλο άκρο του κατέληγε σε σφαίρα ή τμήμα σφαίρας. Στη συνέχεια έγινε δυνατή η κίνηση του αισθητήρα στους 3 άξονες μέσω κινητήρων, η οποία ελέγχεται μέσω υπολογιστή. Στη σημερινή εποχή υπάρχουν περισσότερα είδη αισθητήρων, όπως Laser και υπερήχων, αλλά και οι μηχανικοί δουλεύουν ικανοποιητικά με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα από τα παλιά μοντέλα.

1.1: Είδη αισθητήρων

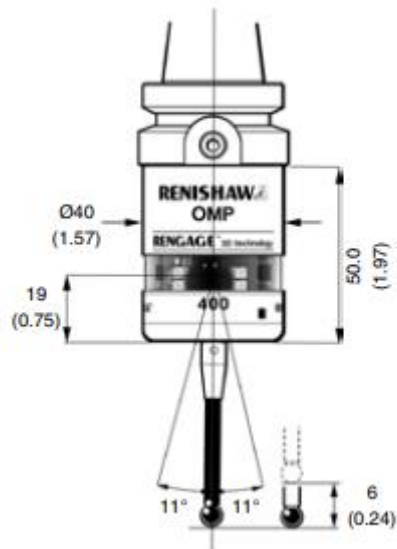
Ο πιο απλός τύπος αισθητήρα είναι αυτός που λαμβάνει το σήμα μέσω της επαφής. Γενικά, αυτός ο αισθητήρας αποτελείται από ένα κυλινδρικό περίβλημα που περιέχει το κύκλωμα που επιτρέπει τη σύνδεσή του με το σύστημα, ένα ελατήριο που συστέλλεται όταν δέχεται κάποια δύναμη, και μια βελόνα, η οποία έχει σφαιρικό ή ημισφαιρικό άκρο. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι ο εξής:

Το άκρο του αισθητήρα έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο, και δέχεται μια μικρή δύναμη. Ανάλογα με τη διάταξη του συγκεκριμένου αισθητήρα, το σύστημα δέχεται σήμα εισόδου όταν πραγματοποιηθεί αυτή η επαφή, και καταγράφει τις συντεταγμένες του σημείου όπου έγινε.

Το εργαλείο μετακινείται αρχικά στους 2 άξονες (X,Y) , και στη συνέχεια στον Z , μέχρι να βρει επαφή. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία, το τεμάχιο μπορεί να ψηφιοποιηθεί και στις 3 διαστάσεις για μελέτη στον υπολογιστή.

Μια εταιρεία που κατασκευάζει τέτοιου τύπου αισθητήρες είναι η Renishaw, με πολλά μοντέλα που παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε ακρίβεια, μέγεθος, απαιτούμενης δύναμης, και κώδικα.

Ένα παράδειγμα είναι ο OMP 400, ο οποίος είναι υψηλής ακρίβειας, ανθεκτικός σε κραδασμούς, γρήγορος, και πιο χρήσιμος για μικρότερα τεμάχια.



Εικόνα 1.1: Αισθητήρας Renishaw OMP400

Η τιμή του συγκεκριμένου αισθητήρα στο eBay είναι περίπου \$1700, ενώ η τιμή ενός παρόμοιου αισθητήρα χαμηλότερης ακρίβειας (OMP40) είναι περίπου \$1300.

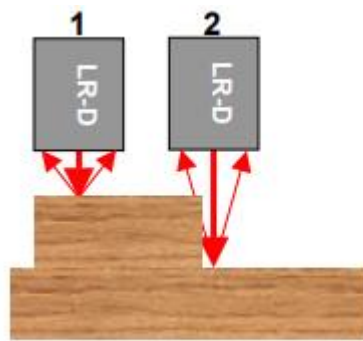
Ένας άλλος τύπος αισθητήρα, είναι ο οπτικός, ο οποίος λειτουργεί με ακτίνες laser. Αυτός ο τύπος γενικά έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από τον προηγούμενο. Είναι επίσης εμφανώς πιο γρήγορος, επειδή δεν απαιτεί κίνηση στον άξονα Z. Το γεγονός ότι δεν έχει βελόνα όπως οι αισθητήρες επαφής σημαίνει ότι δε χρειάζεται ποτέ αντικατάσταση λόγω φθοράς. Παρακάτω φαίνεται ένας τέτοιος αισθητήρας από την εταιρεία ACULUX.



Εικόνα 1.2: Αισθητήρας Dual Optics Noncontact

Το σήμα λαμβάνεται μέσω της αντανάκλασης της ακτίνας laser από το τεμάχιο πίσω στον αισθητήρα. Η μελέτη της γωνίας επιτρέπει την ακριβή μέτρηση της απόστασης του υλικού από την πηγή της ακτίνας. Μια λειτουργία στην οποία αυτός ο τύπος

δίνει καλύτερα αποτελέσματα είναι η εύρεση ακμών στο τεμάχιο. Η ακτίνα που εκπέμπεται αντανακλάται πίσω στον αισθητήρα και διαβάζεται από 2 ανιχνευτές. Αυτό σημαίνει ότι, στην περίπτωση που μελετάται ένα αντικείμενο με γεωμετρία όπως φαίνεται παρακάτω, ο ένας ανιχνευτής δε λαμβάνει σήμα επειδή η ανακλώμενη ακτίνα εμποδίζεται από το τεμάχιο, αλλά ο άλλος λαμβάνει το σήμα κανονικά, άρα δε χρειάζεται σάρωση του αντικειμένου από περισσότερες γωνίες. Σε περίπτωση που υπάρχει αρνητική γεωμετρία απαιτείται η μελέτη με δέσμες από διαφορετικές γωνίες. Στον τομέα της ναυτιλίας ειδικά, πολλά πλοία έχουν βολβό στην πλώρη, του οποίου η επιφάνεια δε μπορεί να αποτυπωθεί όταν οι ακτίνες προσπίπτουν μόνο από μια γωνία.



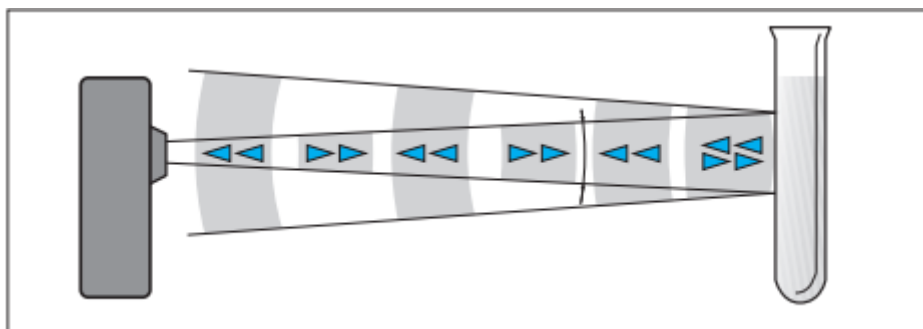
Εικόνα 1.3: Λειτουργία αισθητήρα laser για εύρεση ακμών

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένα μειονέκτημα των αισθητήρων Laser. Αν η δέσμη είναι παράλληλη στην επιφάνεια, ή αν αυτή έχει αρνητική γεωμετρία, τότε υπάρχει αδυναμία μέτρησης των σημείων που βρίσκονται σε αυτό το τμήμα της επιφάνειας. Αυτό λύνεται αν η μελέτη γίνεται με πολλαπλές δέσμες από διαφορετικές γωνίες, ώστε να καταγράφεται η γεωμετρία ολόκληρης της επιφάνειας.

Οι οπτικοί αισθητήρες γενικά έχουν καθαρά πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτούς που λειτουργούν με επαφή, όπως η ταχύτητα και αυξημένη ακρίβεια, ειδικά στην περίπτωση που το αντικείμενο παρουσιάζει απότομες αλλαγές στη γεωμετρία του. Η τιμή του όμως πλησιάζει τα \$2500, άρα είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται μόνο όταν αυτά τα πλεονεκτήματα στην ακρίβεια είναι αναγκαία για την εργασία.

Ένας ακόμα τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιείται βασίζεται στις ιδιότητες των υπερήχων. Ο αισθητήρας εκπέμπει υπερηχητικά κύματα προς το υπό μελέτη τεμάχιο, και η αντανάκλαση των κυμάτων λαμβάνεται ως σήμα εισόδου. Η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των οπτικών, δηλαδή η μελέτη του κύματος επιτρέπει την ταυτοποίηση της απόστασης του υλικού από τον αισθητήρα

ως προς τον άξονα Z. Δεν απαιτείται μετακίνηση του αισθητήρα σε αυτό τον άξονα, επειδή δε δουλεύει με επαφή, άρα έχει ως πλεονέκτημα την ταχύτητα.



Εικόνα 1.4: Αισθητήρας υπερήχων

Παραπάνω φαίνεται η αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου αισθητήρα. Όπως και οι αισθητήρες Laser, έτσι και αυτοί που χρησιμοποιούν υπερήχους βασίζονται στην ανάκλαση των κυμάτων από το μοντέλο πίσω στη μηχανή.

Μια εταιρεία που κατασκευάζει τέτοιους αισθητήρες είναι η Baumer.

Ένα παράδειγμα αισθητήρα της Baumer είναι ο UNCK 09 Proximity Sensor, ο οποίος κοστίζει περίπου \$250.

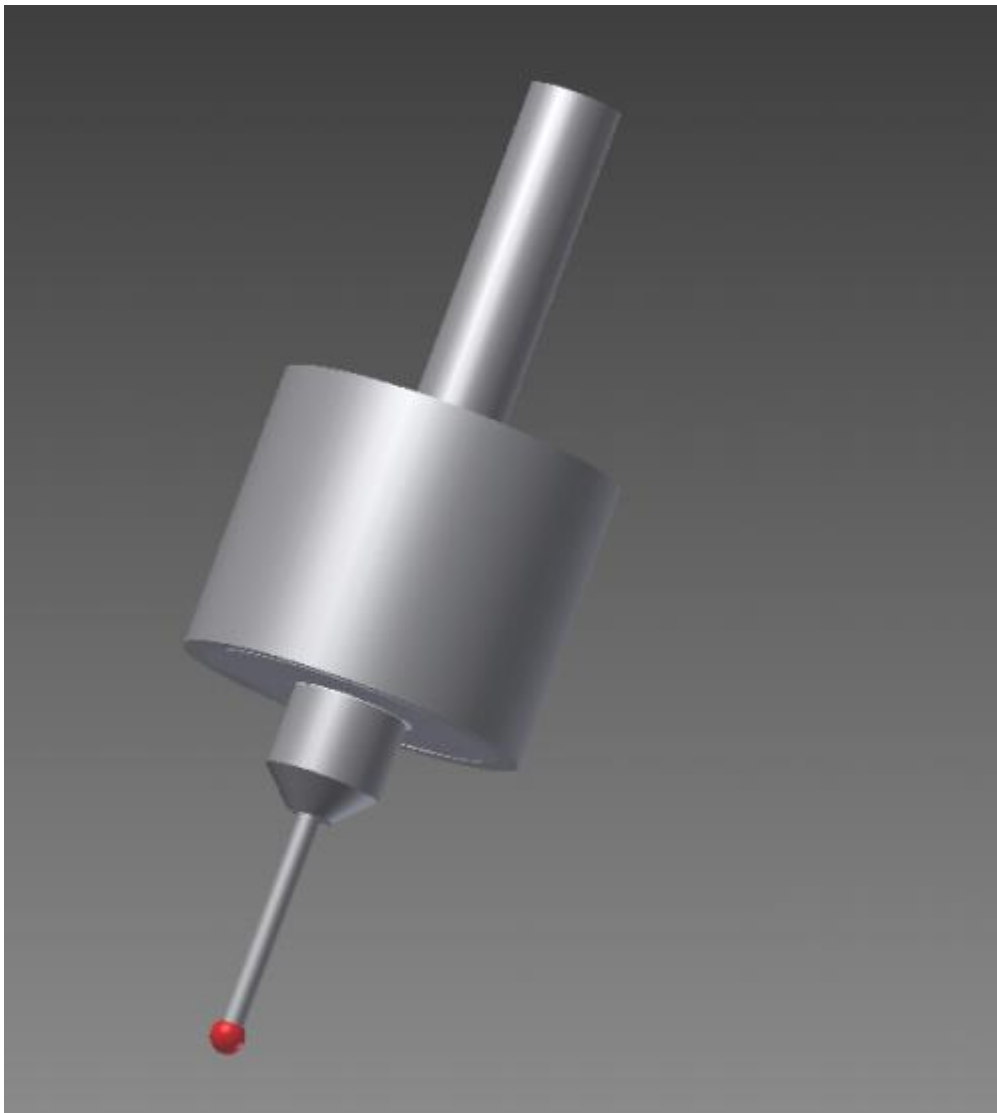
1.2: Επιλογή αισθητήρα

Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή του είδους αισθητήρα είναι το κόστος, η ακρίβεια των μετρήσεων και η ευκολία της κατασκευής. Η ακρίβεια των μετρήσεων θα ήταν μεγαλύτερη αν επιλεγόταν ένας αισθητήρας laser. Η κατασκευή τους όμως είναι πιο περίπλοκη και απαιτεί υλικά με μεγαλύτερο κόστος. Οι μηχανικοί αισθητήρες επαφής μπορούν να κατασκευαστούν πολύ πιο απλά, χρησιμοποιώντας μόνο σωλήνες PVC και κάποια μικρά μεταλλικά τμήματα. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να κατασκευαστεί ένας αισθητήρας επαφής.

Παρακάτω παρουσιάζονται 2 επιλογές από κατασκευαστές

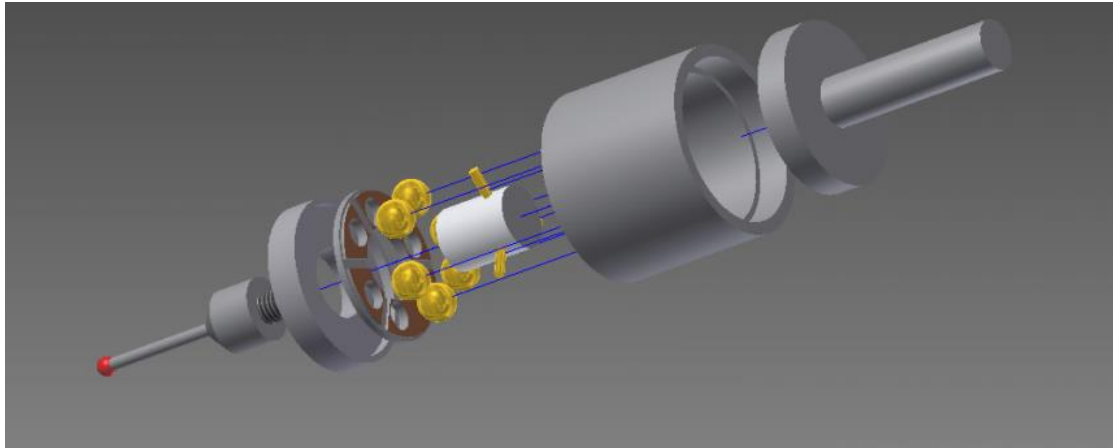
- 1^η επιλογή: *RoboCNC.nl*

Η πρώτη από τις επιλογές πάνω στις οποίες μπορεί να βασιστεί η κατασκευή του αισθητήρα της εργασίας είναι ένας αυτοσχέδιος αισθητήρας που κατασκευάστηκε από τα μέλη της ιστοσελίδας *roboCNC.nl*, η οποία ειδικεύεται σε μηχανές CNC. Εδώ παρουσιάζεται η δομή ενός αισθητήρα μέσω των σχεδίων του κάθε μέρους του, χωρίς να δίνεται αναλυτικά η μορφή του κυκλώματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχέδια του ολοκληρωμένου αισθητήρα και του assembly αντίστοιχα:



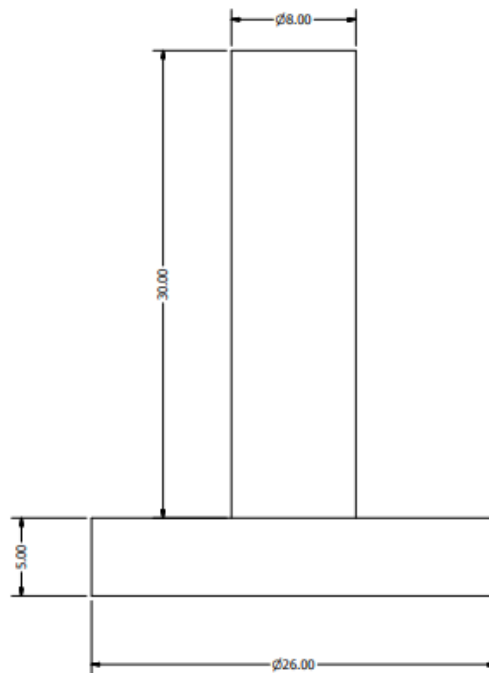
Εικόνα 1.5: Αισθητήρας RoboCNC.nl

Εδώ φαίνεται η μορφή του αισθητήρα όταν αυτός έχει συναρμολογηθεί. Η μορφή του είναι απλή, με έναν κύλινδρο που έχει στο ένα άκρο του τη βελόνα με σφαιρικό άκρο και στην άλλη άκρη του το τμήμα που θα εφαρμοστεί στο CNC.

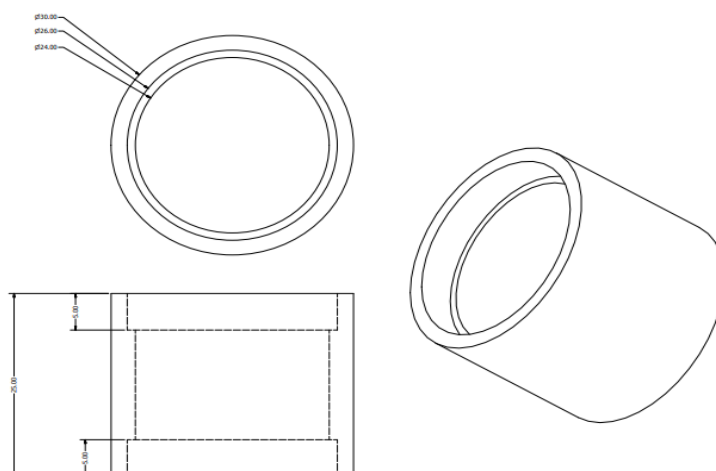


Εικόνα 1.6: Exploded view 1^{ης} επιλογής

Εδώ φαίνεται το εσωτερικό του αισθητήρα. Παρατηρείται ότι υπάρχουν 6 σφαίρες και 3 ράβδοι από μέταλλο, οι οποίες τοποθετούνται στο εσωτερικό του κυλίνδρου και αποτελούν το πιο σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας του αισθητήρα. Τα παρακάτω σχέδια αποτυπώνουν με λεπτομέρεια τη μορφή και τις διαστάσεις του κάθε τμήματος της κατασκευής:

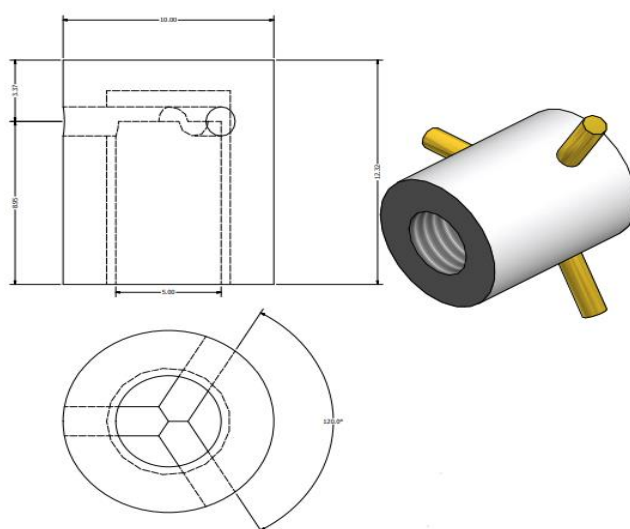


Εικόνα 1.7: Top Cap



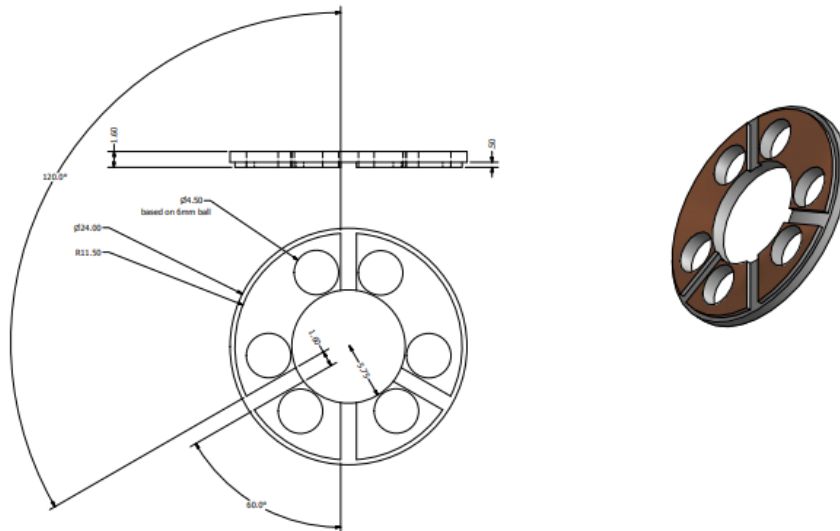
Εικόνα 1.8: Κύλινδρος

Τα 2 παραπάνω εξαρτήματα αποτελούν το “σώμα” του αισθητήρα, και είναι το τμήμα που φαίνεται εξωτερικά. Πάνω φαίνεται το καπάκι που συνδέεται με το CNC, ενώ από κάτω ο κύλινδρος στον οποίο περιέχεται το κύκλωμα, και η διάταξη με τις σφαίρες και τις ράβδους. Παρατηρείται ότι ο κύλινδρος έχει εξωτερική διάμετρο 30 χιλιοστών.



Εικόνα 1.9: Buss

Το τμήμα της εικόνας 1.9 περιλαμβάνει τις 3 μεταλλικές ράβδους οι οποίες θα έρθουν σε επαφή με τις σφαίρες όταν υπάρξει επαφή.

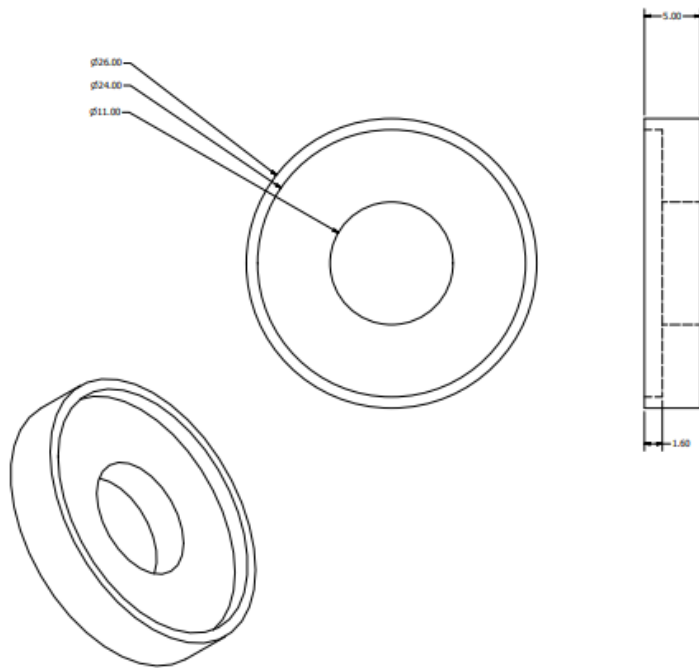


Εικόνα 1.10: Bearing Carrier

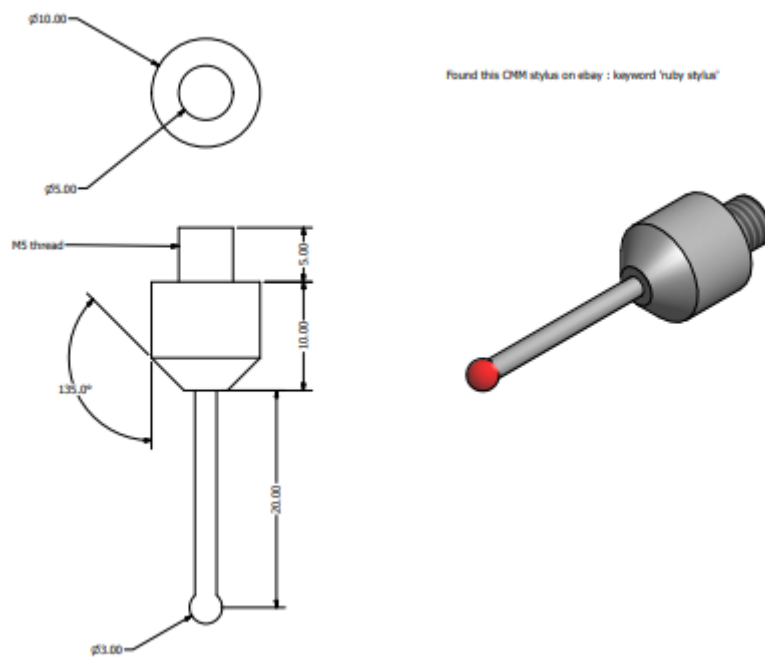
Πάνω στην πλακέτα της εικόνας 1.10 τοποθετείται το κύκλωμα, ενώ στις 6 τρύπες που φαίνονται τοποθετούνται οι μεταλλικές σφαίρες που θα έρθουν σε επαφή με τις ράβδους κατά την επαφή του αισθητήρα με ένα αντικείμενο.

Στην εικόνα 1.11 φαίνεται το καπάκι που βιδώνεται κάτω από τον κύλινδρο του αισθητήρα. Η διάμετρος του είναι κατάλληλη ώστε να μην υπάρχουν ανοχές στη σύνδεσή του με τον κύλινδρο.

Το τελευταίο εξάρτημα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.12, και είναι η βελόνα του αισθητήρα, η οποία θα έρθει σε επαφή με κάποιο αντικείμενο. Το άκρο της είναι σφαιρικό, ενώ στο άλλο άκρο θα τοποθετηθεί ένα ελατήριο το οποίο συστέλλεται όταν δεχτεί κάποια δύναμη.



Εικόνα 1.11: Bottom Cap



Εικόνα 1.12: Stylus

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου αισθητήρα είναι η εξής:

Όπως αναφέρθηκε πριν, το κομμάτι του αισθητήρα που έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο που μελετάται είναι μια βελόνα με ημισφαιρικό/σφαιρικό άκρο. Το άλλο άκρο της βελόνας ακουμπάει στο άκρο ενός ελατηρίου, το οποίο συστέλλεται όταν δεχτεί μια δύναμη. Στη συνέχεια, το εξάρτημα "Buss", το οποίο έχει 3 χρυσές ράβδους, μετακινείται μέσω της συστολής του ελατηρίου. Αυτή η μετακίνηση έχει ως αποτέλεσμα την επαφή των ράβδων με τις 6 σφαίρες που είναι τοποθετημένες στο PCB. Οι σφαίρες αυτές είναι έμμεσα συνδεδεμένες ανά 2 μεταξύ τους, έτσι ώστε να κλείνει κύκλωμα όταν η κάθε ράβδος κατεβαίνει και έρχεται σε επαφή με 2 από τις σφαίρες. Το κλείσιμο του κυκλώματος δίνει την ένδειξη ότι ο αισθητήρας ακούμπησε το υλικό, και οι συντεταγμένες του σημείου εισάγονται στον υπολογιστή.

Για την κατασκευή αυτού του αισθητήρα χρειάζεται η εξής διαδικασία:

Αρχικά γίνεται η κοπή των εξαρτημάτων που δίνονται στα παραπάνω σχέδια. Αντί για σφαιρικά έδρανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχρυσωμένα piercings για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Θα χρειαστούμε 6 σφαίρες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα υπόλοιπα μέρη είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο και βίδες m2.6.

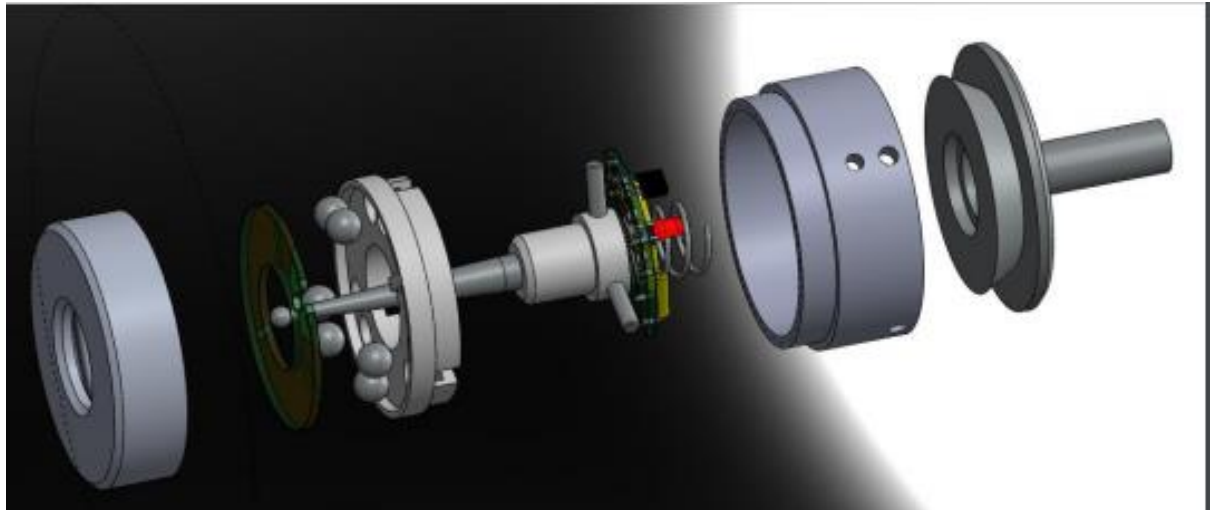
Τα κινούμενα μέρη θα είναι :

- Ruby Tipped Stylus
- 3 χρυσές ράβδοι (χρησιμοποιούμε τα ίδια piercings από τα οποία πήραμε τις σφαίρες)
- Ένα κομμάτι Teflon

Οι ράβδοι τοποθετούνται στο Teflon σε γωνία 120 μοιρών μεταξύ τους και όλο αυτό μετακινείται με τις σφαίρες μέσω της ταλάντωσης ενός ελατηρίου.

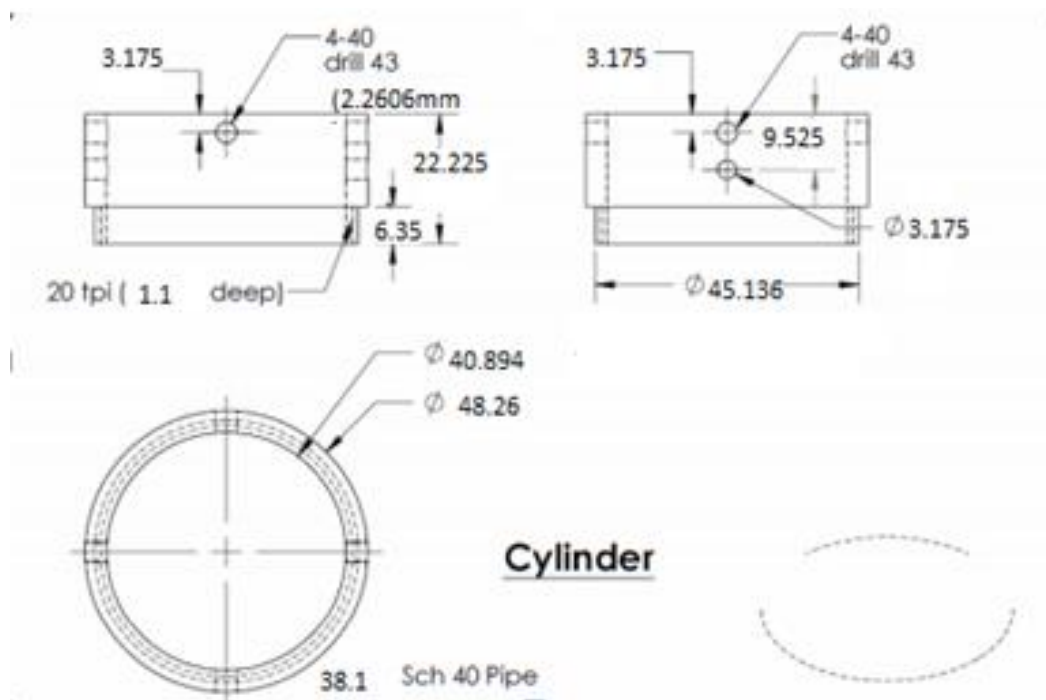
- 2^η επιλογή: *Martin Kennedy- HMSC*

Η δεύτερη επιλογή είναι ένας αισθητήρας που κατασκευάστηκε από τον Martin Kennedy της HMSC (Home Metal Shop Club) το 2012. Ο σκοπός του ήταν η κατασκευή ενός αισθητήρα μεγάλης ακρίβειας με χαμηλό κόστος και δυνατότητα επιλογής διαστάσεων, αφού οι αισθητήρες που κυκλοφορούν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις. Αυτή η κατασκευή παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την προηγούμενη, με τη συστολή του ελατηρίου να φέρνει σε επαφή τις σφαίρες με τις ράβδους. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχέδια του Assembly και των ξεχωριστών εξαρτημάτων του αισθητήρα:



Εικόνα 1.13: Exploded view 2^{ης} επιλογής

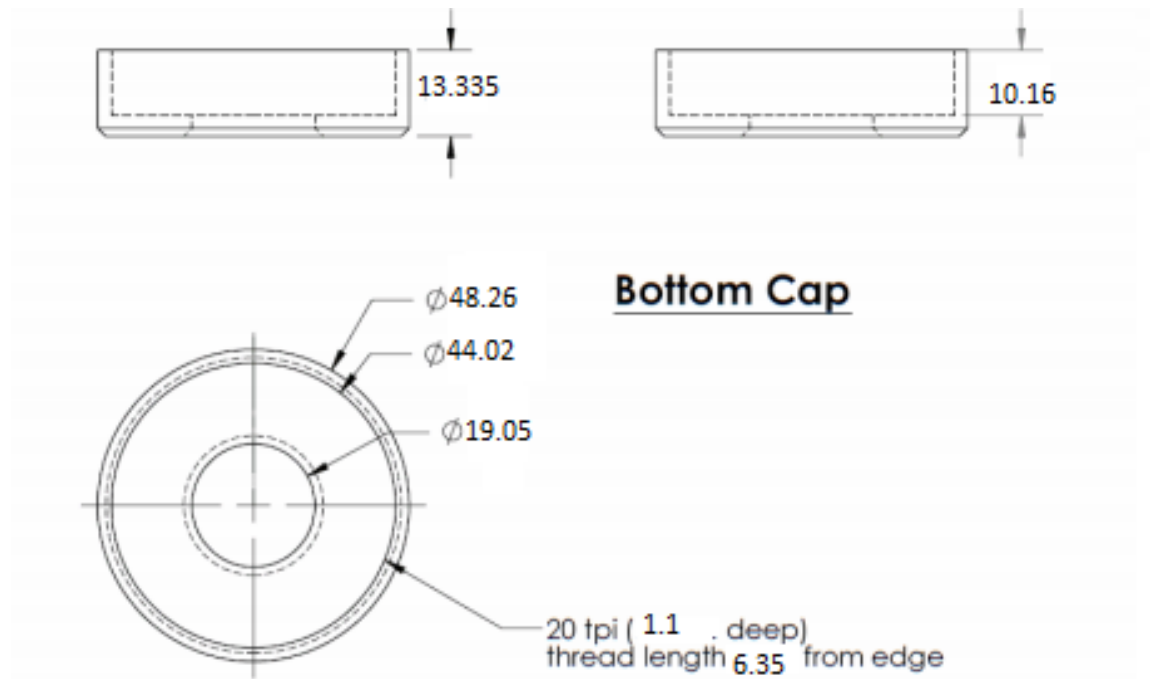
Όπως φαίνεται στην εικόνα, η κατασκευή αυτού του αισθητήρα είναι παρόμοια με την προηγούμενη επιλογή, αλλά το σχέδιο παρουσιάζει πιο πολλές λεπτομέρειες οι οποίες διευκολύνουν την κατασκευή του. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τα σχέδια της 1^{ης} επιλογής, εδώ φαίνεται καθαρά η θέση του ελατηρίου και του κυκλώματος, καθώς και η ακριβής γεωμετρία της πλακέτας του κυκλώματος.



Εικόνα 1.14: Κύλινδρος

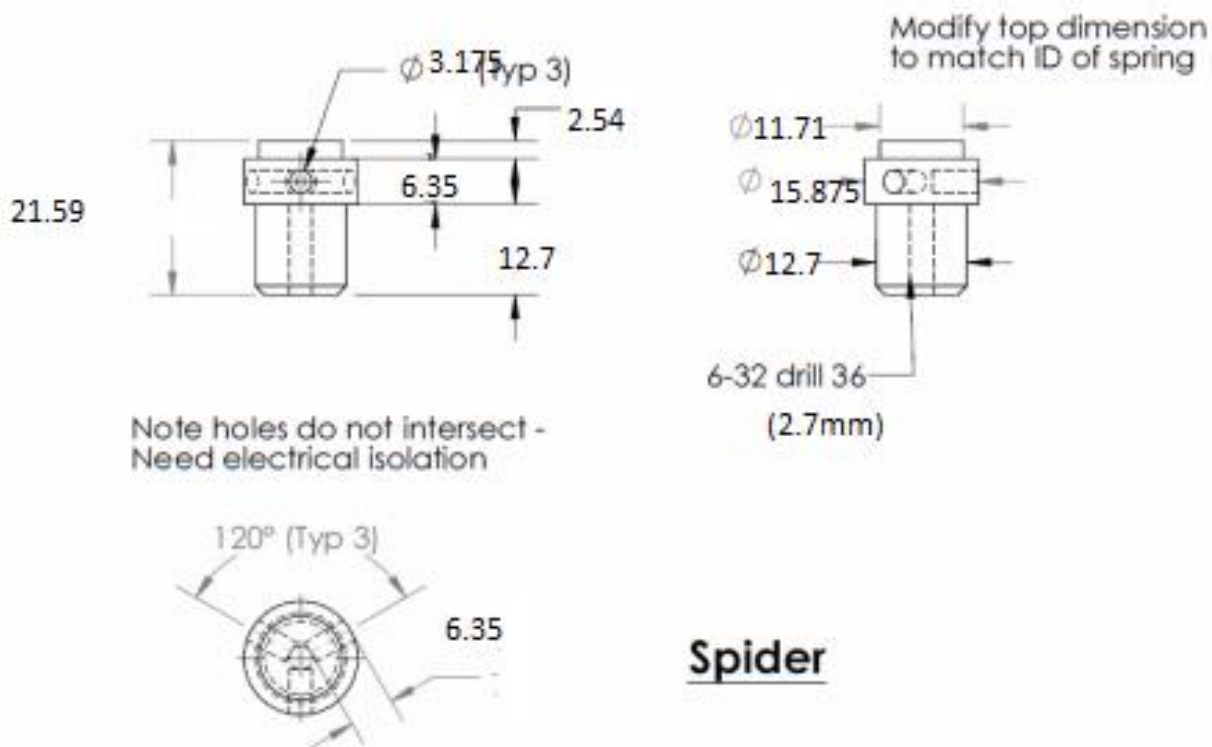
Το παραπάνω τμήμα είναι το κυλινδρικό σώμα, μέσα στο οποίο τοποθετούνται τα spider, circuit board, και bearing carrier. Η εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου είναι

σχεδόν 50 χιλιοστά, πράγμα το οποίο διευκολύνει την τοποθέτηση άλλων εξαρτημάτων στο εσωτερικό του.



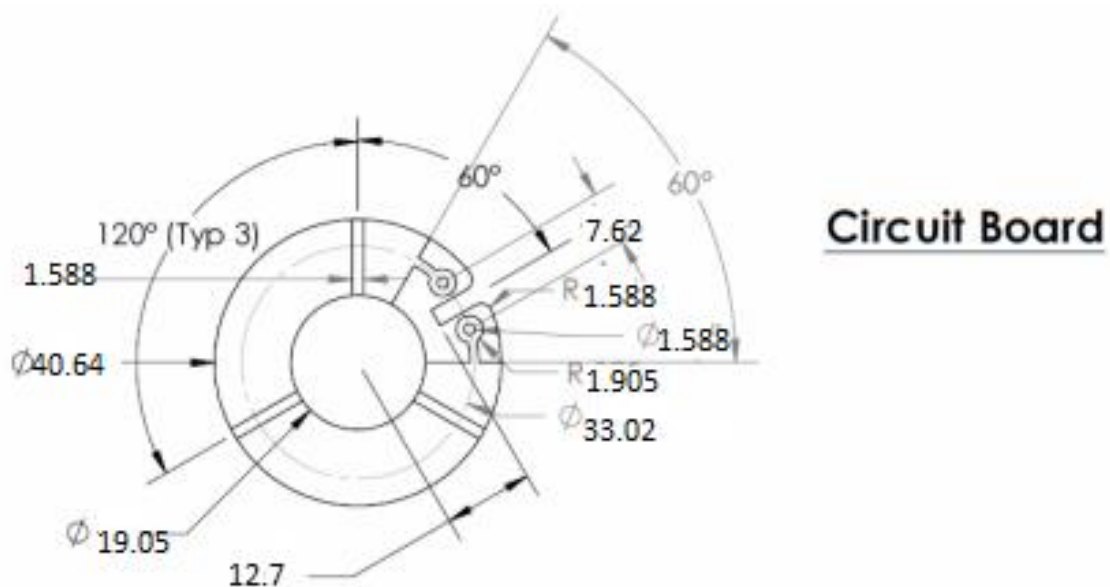
Εικόνα 1.15: Bottom Cap

Εδώ φαίνεται το καπάκι που καλύπτει το εσωτερικό του αισθητήρα από κάτω. Το σχήμα παρουσιάζει τα σχέδια του εξαρτήματος σε πρόοψη και κάτοψη, ώστε να φαίνονται όλες οι διαστάσεις και να είναι σαφές το τμήμα στο οποίο αναφέρεται η κάθε διάσταση. Η διάμετρος αυτού του τμήματος του αισθητήρα επιλέχτηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύνδεσή του με το κυλινδρικό σώμα.



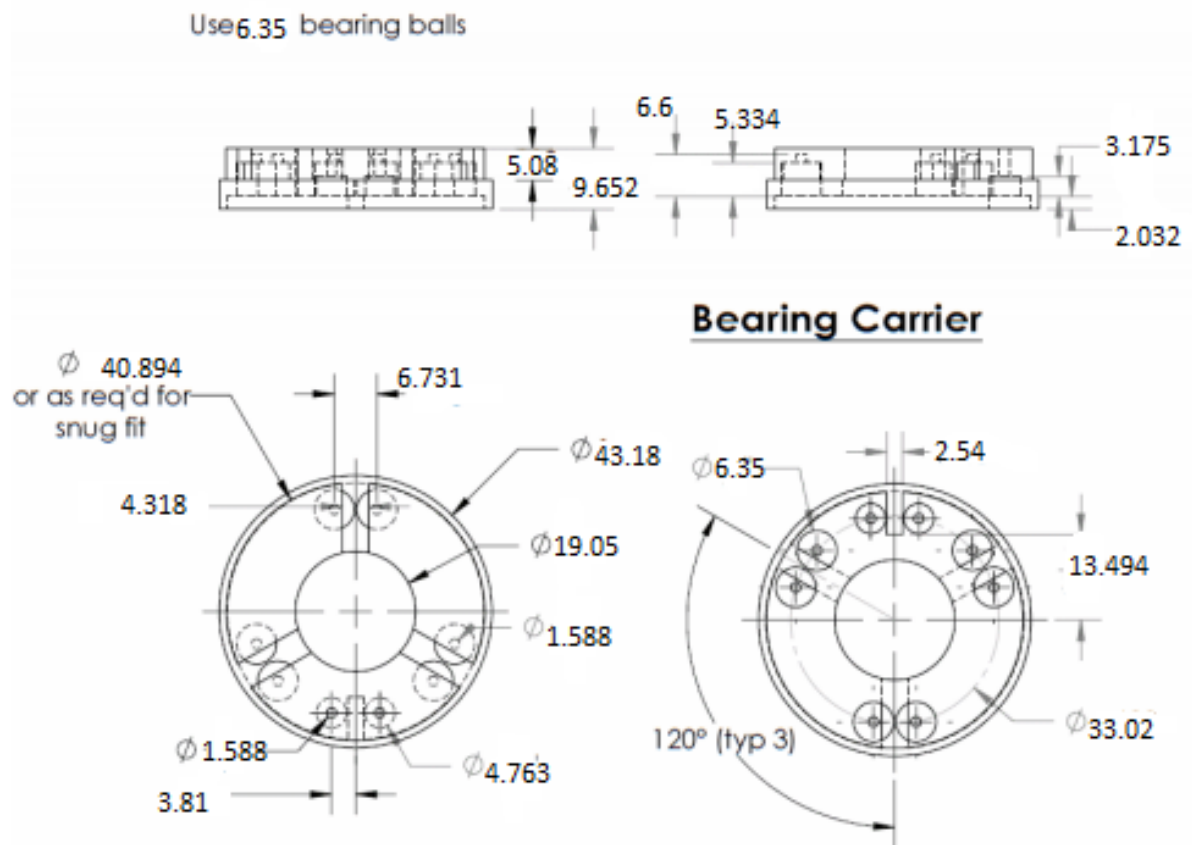
Εικόνα 1.16: Spider

Αυτό το εξάρτημα είναι ένας μικρός πλαστικός κύλινδρος με 3 υποδοχές, στις οποίες τοποθετούνται οι 3 μεταλλικές ράβδοι που χρησιμοποιούνται για το κλείσιμο του κυκλώματος.



Εικόνα 1.17: Circuit Board

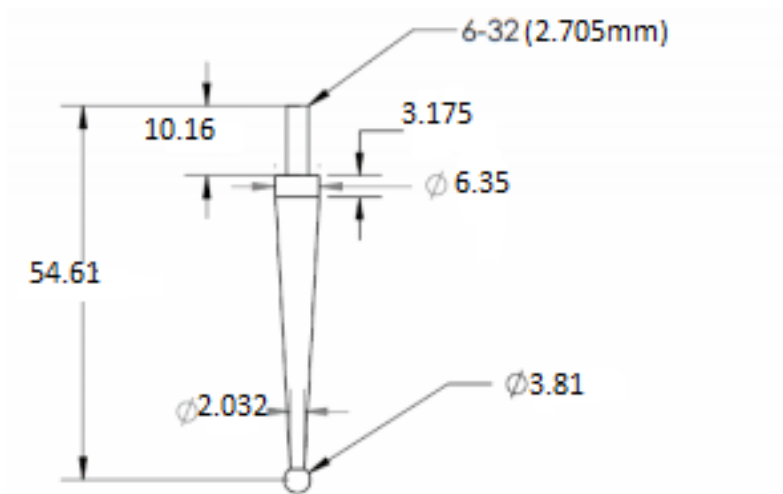
Πάνω σε αυτή την πλακέτα τοποθετείται το κύκλωμα το οποίο θα στείλει σήμα στη CNC όταν υπάρξει επαφή.



Εικόνα 1.18: Bearing Carrier

Το εξάρτημα της εικόνας 1.18 περιλαμβάνει τις υποδοχές των μεταλλικών σφαιρών που έρχονται σε επαφή με τις ράβδους του spider.

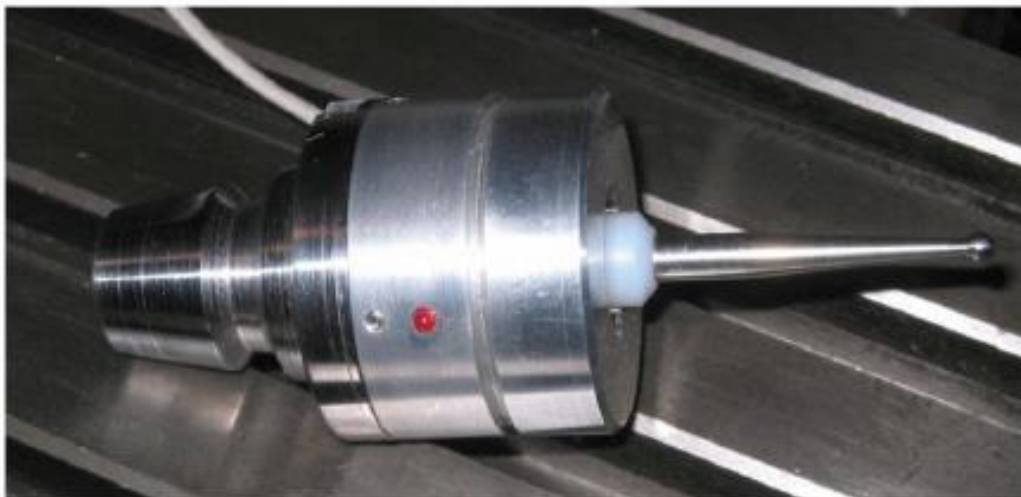
Τέλος, στην εικόνα 1.19 φαίνεται η βελόνα με το σφαιρικό άκρο. Οι διαστάσεις της μπορούν να μεταβληθούν εύκολα και η αλλαγή αυτών επηρεάζει τα αποτελέσματα της μέτρησης. Οι διαστάσεις που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα έχουν μετατραπεί από ίντσες σε χιλιοστά. Το μήκος της βελόνας του αισθητήρα είναι ένας σημαντικός παράγοντας των μετρήσεων. Πολλά αντικείμενα έχουν τέτοιες γεωμετρίες ώστε μια μικρή βελόνα να μη μπορεί να φτάσει σε κάποια τμήματα της επιφάνειάς τους. Επίσης, η διάμετρος της σφαίρας μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία σφάλματος στη μέτρηση, ανάλογα με ποιο σημείο της σφαίρας έρθει σε επαφή με το μοντέλο. Αυτά τα σφάλματα θα συζητηθούν περισσότερο στο κεφάλαιο 6.



Measurement Tip

Εικόνα 1.19: Βελόνα

Εδώ φαίνεται και η τελική μορφή του αισθητήρα, αφού όλα τα κομμάτια κατασκευαστούν και συναρμολογηθούν.

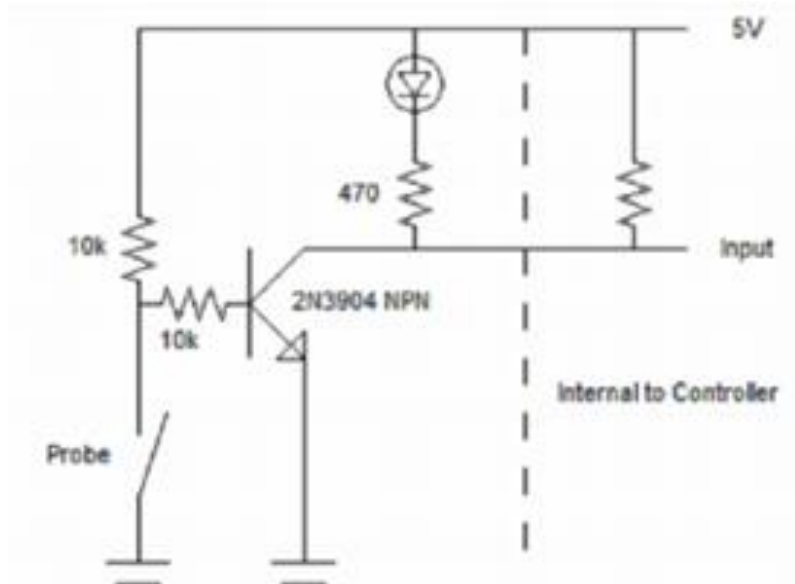


Εικόνα 1.20: Συναρμολογημένος αισθητήρας

Η τιμή αυτού του αισθητήρα στο CNC4PC.com είναι \$135, πολύ πιο φτηνός από έναν αντίστοιχο του εμπορίου.

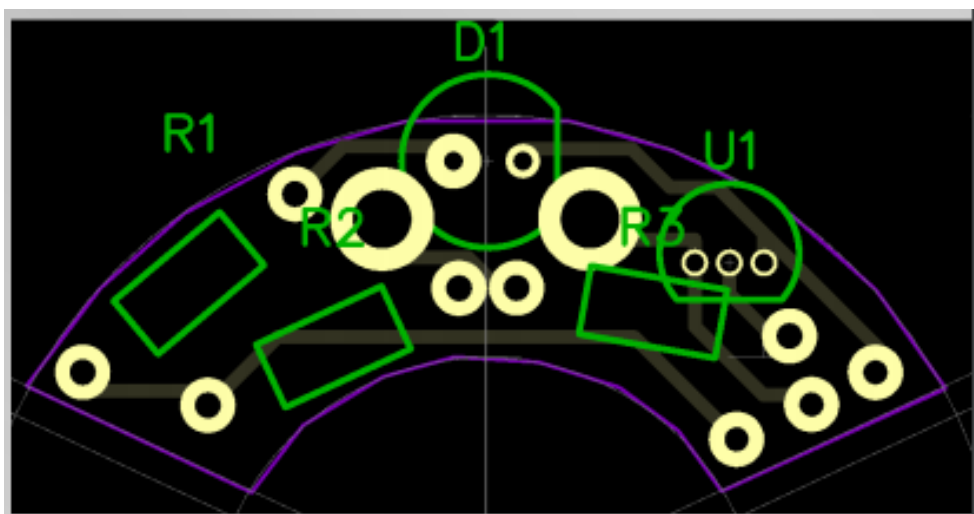
Αυτός ο αισθητήρας παρουσιάζει ένα πρόβλημα όταν συνδέεται με το Mach3.

Χωρίς καμία μεταβολή, ο αισθητήρας θα χρησιμοποιεί τη ρύθμιση active high, ενώ η επιθυμητή είναι η active low. Αυτό που γίνεται δηλαδή, είναι ότι διαπερνάται από ρεύμα όταν δε βρίσκεται σε επαφή με το υλικό, ενώ εμείς θέλουμε το αντίστροφο, για να στέλνει σήμα στο Mach 3 τη στιγμή που θα επιτευχθεί η επαφή. Για αυτό το λόγο γίνεται η χρήση ενός απλού κυκλώματος αντιστροφής.



Εικόνα 1.21: Σχέδιο κυκλώματος

Αυτή είναι η μορφή του κυκλώματος που τοποθετείται στο εσωτερικό του αισθητήρα, πάνω στο Circuit Board. Στο σχήμα φαίνονται οι αντιστάσεις, η σύνδεση του κυκλώματος με τον ελεγκτή του CNC και με τον αισθητήρα, το Transistor, και η δίοδος που θα δώσει φωτεινή ένδειξη στην περίπτωση επαφής. Το σχέδιο του κυκλώματος όπως θα τοποθετηθεί στον αισθητήρα φαίνεται στην εικόνα 1.22



Εικόνα 1.222: Σχέδιο κυκλώματος στην πλακέτα



Εικόνα 1.23: Φωτογραφία κυκλώματος στον αισθητήρα

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το κύκλωμα όπως έχει τοποθετηθεί μέσα στον αισθητήρα, ενώ από κάτω παρουσιάζεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο της πλακέτας. Σε αυτά φαίνονται καθαρά οι ξεχωριστές αντιστάσεις, το transistor, και το LED που θα ανάψει όταν κλείσει το κύκλωμα.

Το κύκλωμα αυτό περιέχει:

2 αντιστάσεις 10kΩ

1 αντίσταση 470Ω

1 transistor 2N3904.

Αυτό το κύκλωμα τοποθετείται στο circuit board που φαίνεται στην εικόνα 1.17, και μπορεί να περιλαμβάνει ένα LED ή ένα βομβητή που θα δίνει επιπλέον (οπτική ή ηχητική) ένδειξη όταν ο αισθητήρας βρει επαφή.

Οι ακριβείς διαστάσεις του του καπακιού (Top cap, δεν εμφανίζεται στα παραπάνω σχέδια), θα προσδιοριστούν έτσι ώστε ο αισθητήρας να προσαρμόζεται στην υποδοχή του CNC.

Το άκρο του αισθητήρα (Measurement tip), αν και έχει γνωστές διαστάσεις από την παρουσίαση της HMSC, θα κατασκευαστεί διαφορετικά. Αρχικά, η διάμετρος θα προσαρμοστεί ανάλογα με τις διαστάσεις των υπολοίπων μερών, και θα κατασκευαστούν 2 διαφορετικά άκρα με διαφορετικά μήκη. Ο σκοπός είναι η δοκιμή της λειτουργίας του αισθητήρα με μεγαλύτερη βελόνα για να επιβεβαιωθεί

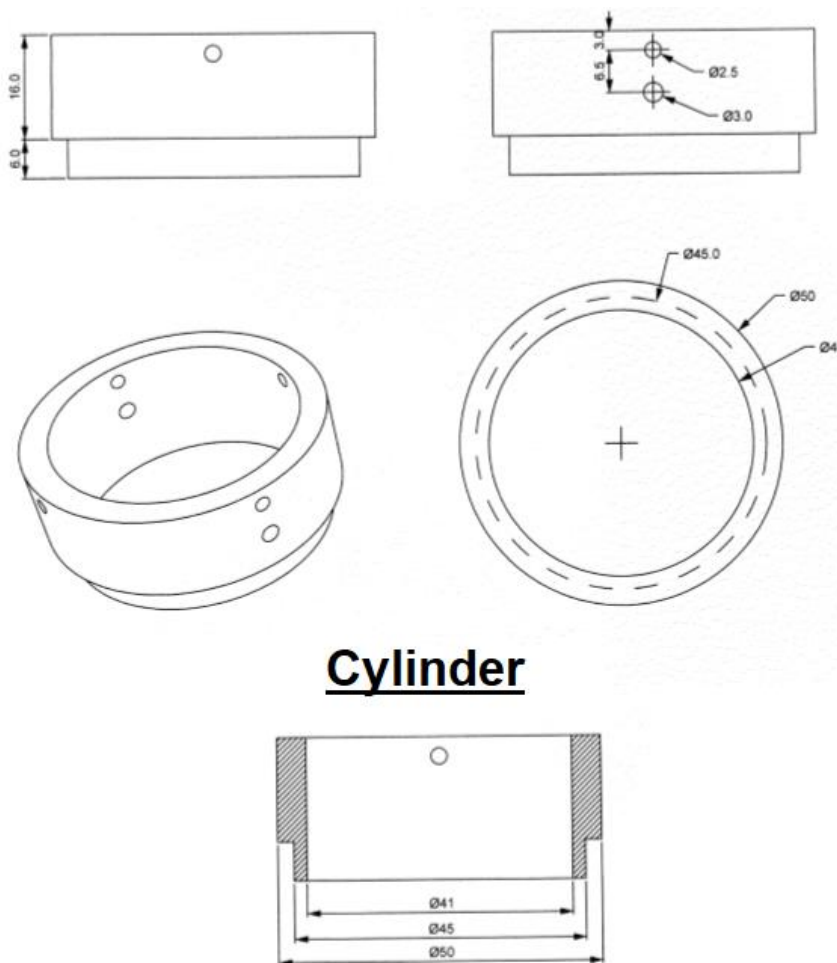
ότι δουλεύει με ικανοποιητική ακρίβεια. Η βελόνα του αισθητήρα μπορεί να μετακινηθεί γύρω από το διαμήκη άξονά της μέχρι μια συγκεκριμένη γωνία. Όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος της, τόσο πιο πολύ θα μετατοπιστεί σε σχέση με μια μικρότερη (για ίδια γωνία).

Τελικά, η πιο κατάλληλη επιλογή για την κατασκευή του αισθητήρα είναι η 2^η, του Martin Kennedy της HMSC.

Ο κύριος λόγος είναι ότι η διάμετρος του κυλίνδρου είναι περίπου 50mm, ενώ η αντίστοιχη της 1^{ης} επιλογής είναι 30mm. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερες δυσκολίες στην τοποθέτηση του κυκλώματος σε πολύ περιορισμένο χώρο.

Οι 2 κατασκευές κατά τα άλλα είναι παρόμοιες, με τη μόνη ουσιαστική διαφορά να είναι οι διαστάσεις, που είναι πλεονέκτημα για τη 2^η επιλογή.

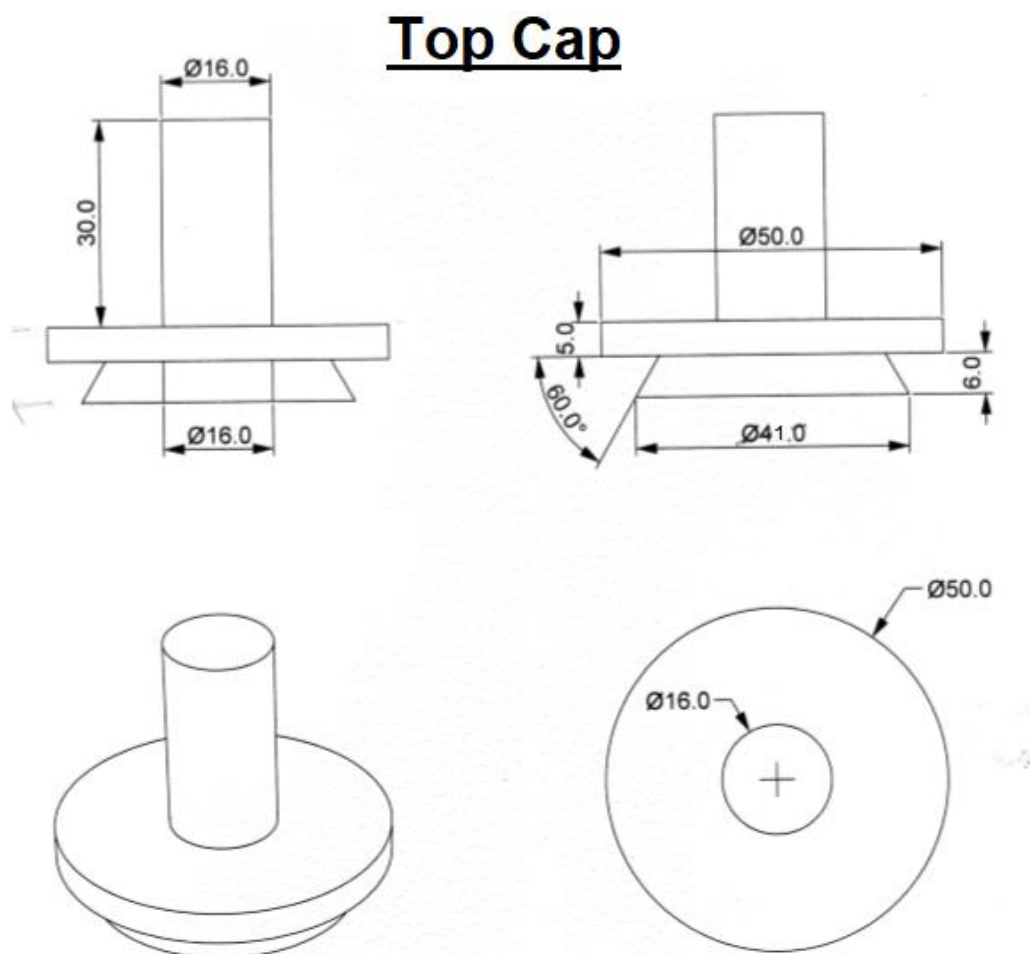
Βασισμένοι σε αυτήν την επιλογή, η τελική μορφή του αυτοσχέδιου αισθητήρα μας θα είναι η εξής:



Cylinder

Εικόνα 1.23: Κύλινδρος αισθητήρα

Στην εικόνα 1.24 φαίνεται ο κύλινδρος που αποτελεί το κύριο “κέλυφος” του αισθητήρα. Αυτό έχει τη μεγαλύτερο διάμετρο από τα υπόλοιπα, και επιλέχτηκε στα 50mm.

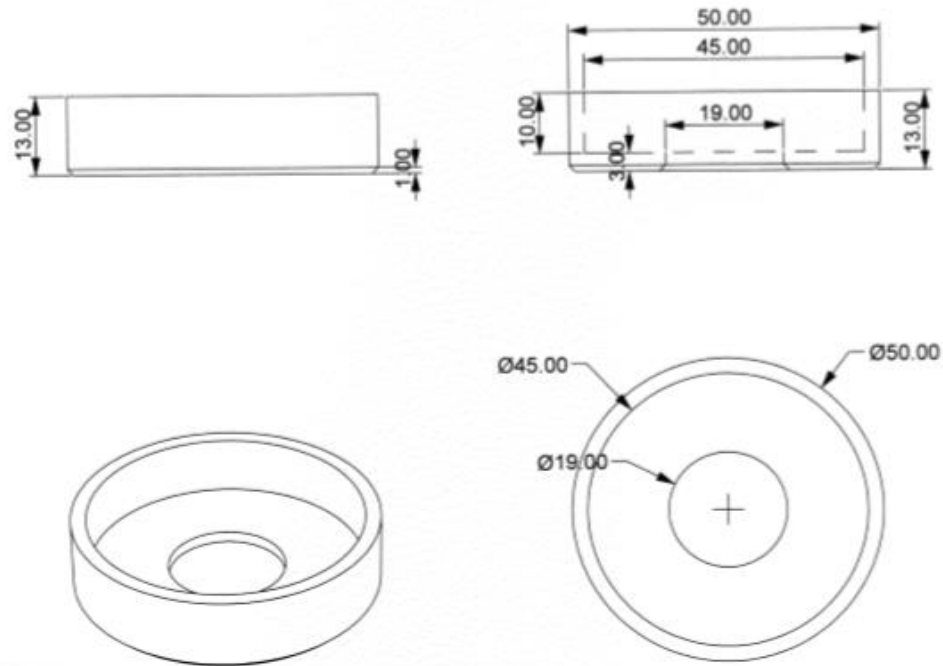


Εικόνα 1.24: Πάνω καπάκι αισθητήρα

Αυτό το κομμάτι δεν υπήρχε στα σχέδια της εταιρείας, αλλά οι περισσότερες από τις διαστάσεις του δεν έχουν μεγάλη σημασία. Το μόνο σημαντικό είναι η εφαρμογή του στο άκρο του κυλίνδρου του αισθητήρα, καθώς η υποδοχή του CNC έχει μεταβαλλόμενη διάμετρο. Το λεπτό κυλινδρικό κομμάτι του θα κατασκευαστεί με μεταλλικό υλικό και θα τοποθετηθεί μετά στο υπόλοιπο κομμάτι του καπακιού. Ο λόγος είναι ότι αυτός ο κύλινδρος πρέπει να έχει μεγαλύτερη αντοχή επειδή

τοποθετείται στην υποδοχή του CNC. Όπως θα φανεί και στις εικόνες του κεφαλαίου 2, αυτός ο μεταλλικός κύλινδρος μπορεί να είναι μονοκόμματος ή να έχει σπείρωμα.

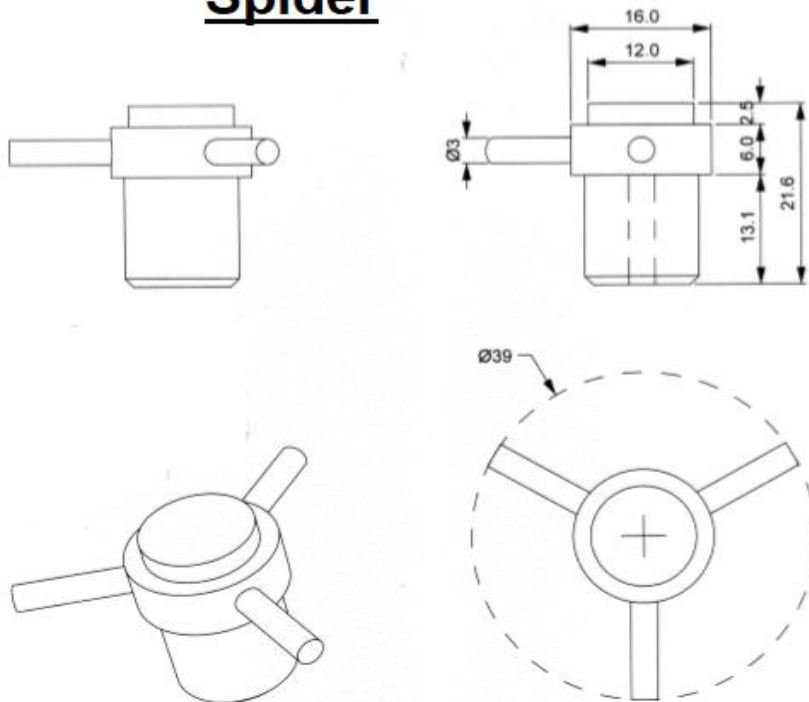
Bottom Cap



Εικόνα 1.25: Κάτω καπάκι αισθητήρα

Οι διαστάσεις αυτού του τμήματος επιλέχτηκαν κατάλληλα ώστε να συνδέεται με τον κύλινδρο χωρίς μετακινήσεις. Μέσα από την τρύπα που βρίσκεται στο κέντρο του θα περνάει η βελόνα του αισθητήρα, η οποία θα μπορεί να περιστρέφεται κατά κάποιες μικρές γωνίες. Για μεγαλύτερη ασφάλεια σε αυτό το εξάρτημα γίνεται να τοποθετηθούν βίδες, οι οποίες θα το συνδέουν με τον κύλινδρο χωρίς να υπάρχουν περιστροφές.

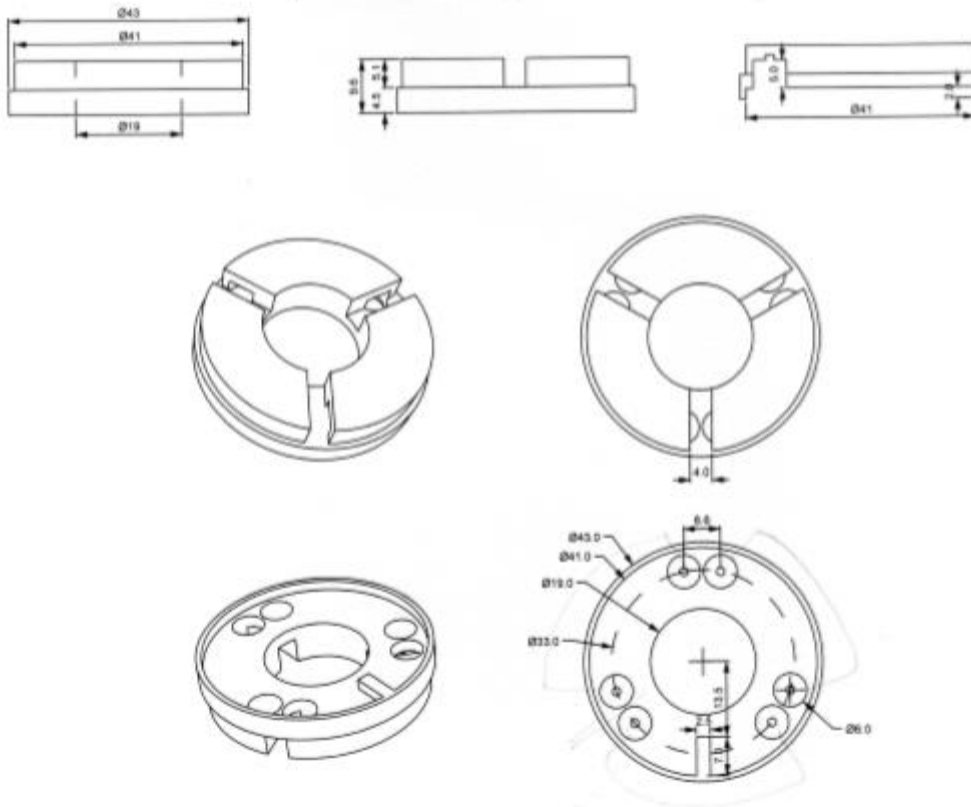
Spider



Εικόνα 1.26: Τμήμα αισθητήρα με ράβδους

Αυτό το τμήμα έχει τις μικρότερες διαστάσεις, και πάνω του τοποθετούνται οι 3 ράβδοι ανά 120 μοίρες. Οι ορθογωνικές υποδοχές που βρίσκονται στο εξάρτημα της εικόνας 1.28 είναι επίσης τοποθετημένες ανά 120 μοίρες. Όταν ο αισθητήρας πάρει την τελική του μορφή, οι ράβδοι εισέρχονται σε αυτές τις υποδοχές και έρχονται σε επαφή με τις μεταλλικές σφαίρες. Για αυτό το λόγο το άνοιγμα των υποδοχών και η τοποθέτηση των ράβδων σε αυτά τα 2 εξαρτήματα πρέπει να γίνει με ακρίβεια ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα μη επαφής.

Bearing Center



Εικόνα 1.27: Τμήμα αισθητήρα με σφαίρες

Εδώ θα τοποθετηθούν οι σφαίρες. Οι διαστάσεις επιλέχτηκαν και πάλι κατάλληλα ώστε να γίνεται σωστά η σύνδεσή του με τα υπόλοιπα μέρη.

Το κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί για την αντιστροφή της τάσης είναι ίδιο με αυτό του αισθητήρα της HMSC, με μια επιπλέον ηχητική ένδειξη που ενεργοποιείται μαζί με το LED όταν ο αισθητήρας βρίσκει επαφή με το αντικείμενο. Η βελόνα θα έχει τις κατάλληλες διαστάσεις ώστε να εφαρμόσει στα υπόλοιπα μέρη, και όπως αναφέρθηκε πριν, θα δοκιμαστούν 2 βελόνες με διαφορετικά μήκη.

Αφού η διαδικασία της σχεδίασης του αισθητήρα ολοκληρώθηκε, μπορεί να ξεκινήσει η κατασκευή του. Αρχικά τα κομμάτια θα κατασκευαστούν από σωλήνα PVC για να δοκιμαστούν και να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία και ακρίβεια του αισθητήρα. Όταν ολοκληρωθούν οι δοκιμές με επιτυχία, τότε θα ξεκινήσει η κατασκευή του ίδιου αισθητήρα αλλά με μεταλλικά μέρη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση μελέτης μη μεταλλικών αντικειμένων, η επαφή του αισθητήρα με το αντικείμενο πρέπει να ασκεί μικρότερη δύναμη για να αποφευχθεί φθορά του μαλακού υλικού.

Τα μοντέλα που θα μετρηθούν στα πλαίσια της διπλωματικής είναι από ξύλο ή πλαστικό, άρα για την αποφυγή μεγάλης δύναμης πρέπει η ταχύτητα του αισθητήρα να είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή.

2: Κατασκευή του αισθητήρα

Το κτίριο υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών διαθέτει μια αίθουσα μηχανουργείου. Σε αυτή υπάρχουν διάφορες μηχανές που χρησιμεύουν στην κοπή και διαμόρφωση αντικειμένων. Για την κατασκευή του αισθητήρα θα χρησιμοποιηθεί τόννος και φρέζα. Τα ξεχωριστά εξαρτήματα του αισθητήρα, των οποίων τα σχέδια φαίνονται στις εικόνες, θα κατασκευαστούν αρχικά από σωλήνα PVC. Εξαιρεση αποτελούν οι σφαίρες (στο Bearing Carrier) και οι ράβδοι (στο Spider) που χρησιμεύουν για να κλείσει το κύκλωμα είναι μεταλλικές, όπως και το κυλινδρικό κομμάτι του “Top Cap” που βιδώνεται στο CNC.

Η διαδικασία κατασκευής των κομματιών έγινε κυρίως σε τόννο, αφού τα περισσότερα από αυτά έχουν κυλινδρική συμμετρία.

Στην περίπτωση του Bearing Carrier, υπάρχουν 6 τρύπες στις οποίες μπαίνουν οι σφαίρες και 3 εγκοπές ανά 120 μοίρες. Σε αυτήν την περίπτωση, καθώς και στις τρύπες του Spider στις οποίες μπαίνουν οι μεταλλικές ράβδοι, και στις τρύπες μέσα από τις οποίες θα περάσουν βίδες για τη σύνδεση των εξαρτημάτων μεταξύ τους, χρησιμοποιήθηκε και φρέζα.



Εικόνα 2.1: Τόννος

Ο τόρνος χρησιμοποιείται συχνά σε μηχανουργικές διεργασίες, και συγκεκριμένα σε εξαρτήματα με κυλινδρική συμμετρία. Υπάρχει η δυνατότητα κοπής υλικού, μείωση της διαμέτρου του σε κάποιο επιθυμητό επίπεδο, ή εισαγωγή σπειρώματος.



Εικόνα 2. 2: Φρέζα

Η φρέζα χρησιμοποιείται για ευθύγραμμη κοπή. Τα τμήματα του αισθητήρα που δεν έχουν κυλινδρική συμμετρία διαμορφώθηκαν σε αυτή τη μηχανή. Επίσης γίνεται να τοποθετηθεί κατάλληλο τρυπάνι για τη δημιουργία τρύπας με σπείρωμα. Στη συγκεκριμένη κατασκευή η φρέζα χρησιμοποιήθηκε για το άνοιγμα των ορθογωνικών υποδοχών του Bearing Center, και σε κάθε περίπτωση που έπρεπε να ανοίξουν τρύπες σε κάποιο εξάρτημα ώστε να περάσουν βίδες.

Τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν παρουσιάζονται ξεχωριστά στις παρακάτω φωτογραφίες:



Εικόνα 2. 3: Cylinder



Εικόνα 2.4: Bottom Cap

Τα 2 παραπάνω εξαρτήματα είναι το σώμα και το καπάκι του αισθητήρα, τα οποία καλύπτουν τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του αισθητήρα.

Η μεταλλική ράβδος του τμήματος της εικόνας 2.5 συνδέεται με τη μηχανή CNC. Μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί, και γίνεται ή να έχει σπείρωμα ή κυλινδρική μορφή.



Εικόνα 2.5: Top Cap



Εικόνα 2.6: Spider χωρίς και με τις ράβδους

Σε αυτό το κομμάτι τοποθετούνται οι ράβδοι που θα πρέπει να έρθουν σε επαφή με τις σφαίρες. Στις εικόνες παρουσιάζεται η μορφή του πριν και αφού τοποθετηθούν οι ράβδοι.



Εικόνα 2.7: Bearing Center



Εικόνα 2 8: Spider και Bearing Center

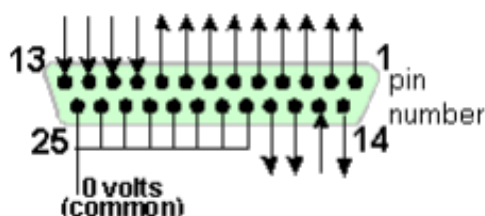
Όπως φαίνεται εδώ, οι ράβδοι έχουν τοποθετηθεί άνα 120 μοίρες, όπως και οι ορθογωνικές υποδοχές του Bearing Center. Στις κυκλικές υποδοχές τοποθετούνται οι σφαίρες. Επίσης φαίνεται ο μηχανισμός με τον οποίο θα κλείνει το κύκλωμα όταν ο αισθητήρας βρίσκει επαφή με το τεμάχιο. Ένα ελατήριο θα τοποθετηθεί στην κορυφή του Spider, και όταν δεχτεί τη δύναμη, αυτό θα συμπιεστεί και θα σπρώξει το Spider προς το μέρος του Bearing Center, φέρνοντας σε επαφή τα μεταλλικά, αγωγικά μέρη μεταξύ τους.

3: Λειτουργία και σύνδεση μηχανής CNC

Για την κατανόηση της λειτουργίας του αισθητήρα, πρέπει να περιγραφεί η σύνδεση του αισθητήρα με το CNC, και η λειτουργία της ίδιας της μηχανής. Το εργαστήριο του κτιρίου υδροδυναμικής της σχολής διαθέτει μια μηχανή CNC, και το πρόγραμμα του υπολογιστή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της διαδικασίας είναι το Mach3. Αυτό το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα ελέγχου της κίνησης ενός εργαλείου κατά τους 3 άξονες x,y,z και περιστροφή του ως προς τον άξονα z. Ο περιστροφικός άξονας αναφέρεται μερικές φορές σαν "A" ή "4". Στην περίπτωση του αισθητήρα δεν απαιτείται περιστροφή, καθώς αυτή η λειτουργία είναι κυρίως για κοπτικά εργαλεία. Εκτός από την κίνηση, υπάρχει η δυνατότητα της δημιουργίας μιας επαναληπτικής διαδικασίας, ή ενός "μονοπατιού" στο οποίο θα μετακινηθεί ο αισθητήρας, ή οποιοδήποτε εργαλείο. Όπως και όλα τα σήματα του υπολογιστή, τα σήματα εισόδου και εξόδου του Mach3 είναι σε δυαδική μορφή. Η μορφή που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος μπορεί να είναι αρκετά ομαλή και συνεχής, αλλά αξίζει να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί στην πραγματικότητα το σύστημα. Αυτά τα σήματα μεταφράζονται από τις τάσεις που περνάνε από τις γραμμές της θύρας. Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου TTL (transistor-transistor logic). Σε αυτά τα κυκλώματα, οι τάσεις μεταξύ 0 και 0.8 Volt αποκαλείται "lo" και η τάση μεταξύ 2.4 και 5 Volt "hi". Αν η τάση είναι αρνητική ή μεγαλύτερη των 5 Volt τότε το κύκλωμα θα βγάλει καπνό. Στην κατάσταση "lo", το ρεύμα κινείται **προς** τον υπολογιστή, ενώ στην "hi" το ρεύμα φεύγει **από** τον υπολογιστή. Όσο περισσότερο ρεύμα ρέει προς τον υπολογιστή, τόσο πιο δύσκολη είναι η διατήρηση της τάσης κοντά στο 0, άρα πλησιάζει στο όριο των 0.8 Volt. Με τον ίδιο τρόπο, όσο περισσότερο ρεύμα φεύγει από τον υπολογιστή τόσο πιο κοντά φτάνουμε στην οριακή τάση των 2.4 Volt. Αυτό σημαίνει ότι για μεγάλα ρεύματα η διαφορά των lo και hi είναι κοντά στα 1.6 Volt, άρα, αν ληφθεί υπόψη και το σφάλμα, δε μπορούμε να τα ξεχωρίσουμε με αξιοπιστία. Ως αποτέλεσμα, η κατάσταση "lo" αναθέεται σε λογικό σήμα "1" και η "hi" σε 0. Αυτό ονομάζεται "active lo", και το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η θύρα πρέπει να διαπερνάται συνεχώς από τάση 5 Volt. Το αντίθετο λέγεται "active hi". Το ρεύμα που πρέπει να παρέχεται στον υπολογιστή είναι μικρότερο από 40mA (hi inputs), ενώ θα παρέχει ρεύμα μικρότερο των 0.4mA (lo inputs).

3.1: Σύνδεση του CNC με τον αισθητήρα

Η μηχανή CNC συνδέεται με εξωτερικές συσκευές μέσω των παραλλήλων θυρών του υπολογιστή που παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.1: Θηλυκή παράλληλη θύρα D 25 ακροδεκτών

Η συγκεκριμένη θύρα είναι η συνηθισμένη “D connector” με 25 ακροδέκτες. Η γραμμή 1 διατηρεί τάση στα επίπεδα των 2.8-5Volt, αλλά αυτή η τάση πέφτει κάτω από μισό Volt όταν μεταφέρονται δεδομένα. Οι 8 γραμμές 2-9 (8 bit) μεταφέρουν τα δεδομένα. Αν το bit έχει τιμή 1 τότε η αντίστοιχα γραμμή διαπερνάται από τάση 5 Volt, αλλιώς δεν περνάει τάση. Η γραμμή 10 δουλεύει παρόμοια με την 1, δηλαδή διατηρεί μια τάση η οποία πέφτει όταν τα δεδομένα ληφθούν από τη συσκευή (CNC). Αν η εξωτερική συσκευή είναι απασχολημένη, τότε η γραμμή 11 φορτίζεται. Η τάση της πέφτει όταν υπάρχει ξανά η δυνατότητα αποστολής δεδομένων. Η γραμμή 12 χρησιμοποιείται στους εκτυπωτές, και στέλνει σήμα όταν ο εκτυπωτής δεν έχει χαρτί. Η γραμμή 13 διαπερνάται από ρεύμα όσο η συσκευή είναι συνδεδεμένη με τον υπολογιστή. Η 14 στέλνει συνεχές σήμα στη συσκευή με τάση 5 Volt. Σε περίπτωση προβλήματος η γραμμή 15 στέλνει σήμα ρίχνοντας την τάση που τη διαπερνάει. Η γραμμή 16 ενεργοποιείται όταν η συσκευή είναι έτοιμη για την εκκίνηση της διαδικασίας. Η γραμμή 17 χρησιμοποιείται για το σβήσιμο της συσκευής από τον υπολογιστή. Τέλος, οι γραμμές 18-25 χρησιμοποιούνται σαν γείωση.

3.1.1: CNC breakout board

Η παράλληλη θύρα έχει 8 γραμμές (18-25) που συνδέονται με τον υπολογιστή σε τάση 0 Volt. Η παρουσία μεγάλου αριθμού καλωδίων, ειδικά αν είναι κοντά σε άλλα καλώδια υψηλών τάσεων, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, τα οποία μπορεί να είναι από θόρυβο μέχρι βλάβη στον υπολογιστή (crash).

Για αυτό το λόγο είναι καλό να χρησιμοποιηθεί μια πλακέτα απομόνωσης (isolating breakout board). Σε αυτή την πλακέτα είναι εύκολο να συνδεθούν όλα τα καλώδια

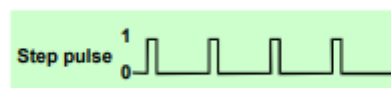
μηδενικής τάσης ξεχωριστά από τα υπόλοιπα. Παρακάτω παρουσιάζονται 3 εμπορικές πλακέτες αυτού του είδους:



Εικόνα 3.2: CNC isolating breakout boards

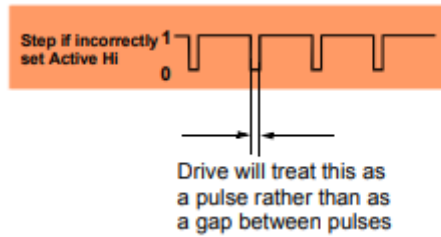
3.1.2: Σήμα εξόδου

Το σήμα που στέλνει το Mach 3 έχει μορφή βηματικής συνάρτησης παλμών. Όσο πιο γρήγορα είναι τα βήματα, τόσο μεγαλύτερα είναι τα κενά μεταξύ των παλμών.



Εικόνα 3.3: Μορφή βηματικών παλμών (Active Lo)

Αυτό το σήμα χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις. Στην αντίθετη περίπτωση (Active Hi), οι παλμοί έχουν την παρακάτω μορφή:



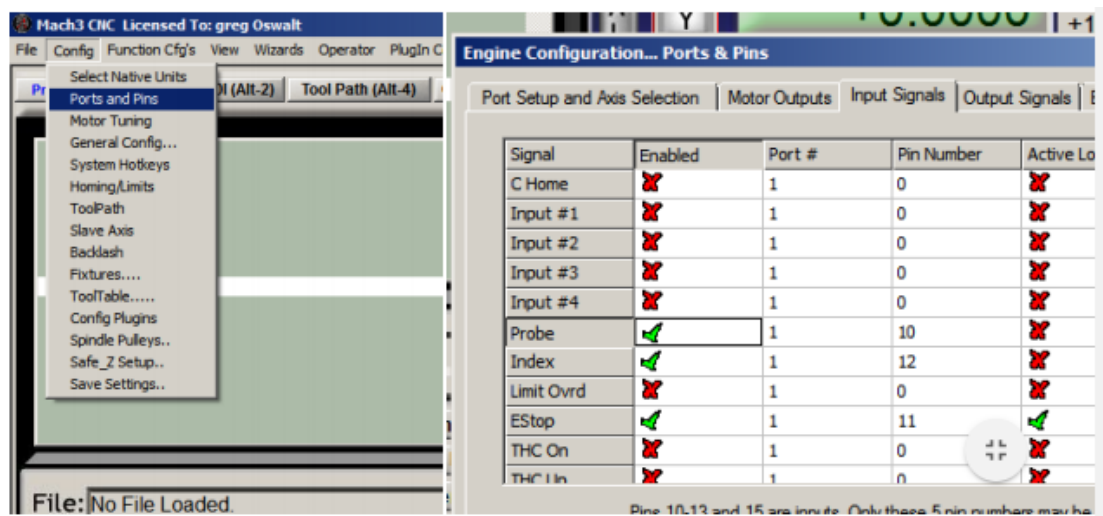
Εικόνα 3. 4: Αντεστραμμένοι παλμοί

Αυτή η κατάσταση γενικά προκαλεί μη αξιόπιστη λειτουργία και δεν είναι επιθυμητή.

Αυτό συμβαίνει επειδή ο υπολογιστής θα θεωρήσει ότι το τμήμα που φαίνεται στο σχήμα ότι πάει στο 0 είναι παλμός, ενώ στην πραγματικότητα αυτό το τμήμα είναι το διάστημα μεταξύ 2 παλμών.

3.2: Χρήση του Mach3 για digitizing

Για την ενεργοποίηση του αισθητήρα, ακολουθούμε τις εξής οδηγίες.



Εικόνα 3.5: Menu του Mach3

Αρχικά πρέπει να επιλέξουμε το probe στα input signals.

Στη συνέχεια βρίσκουμε το "digitize wizard" στην καρτέλα "Wizards".

Cam Function Addons

These Wizards are donated by users to the community of Mach users, they are unsupported, but found to be very useful.
Please report any trouble on the Yahoo support group for Mach3, and repairs will be done as time allows.

Function Name	Description	Author
4th Axis Digitize	Creates Digitizing Program	Art Fenerty
Angle slot 2v4	Angle Slot Cutter Rev. 2.4	Jeff Elliott
Circle Center	Circle Center v1	German Bravo
Circular bolt pattern	Drill Circular Bolt Pattern	Brian Barker
Circular Pocket	Cut a Circular Pocket	Brian Barker
CopyCat	Jog and Learn for Router	Newfangled Solutions
Cut Arc	Cut Arc	Brian Barker
Cut Circle	Cut Circle	Kiran
Cut spline or gear	Gears and Splines	Brian Barker / updated By ...
Digitize Wizard	Creates Digitizing Program	Art Fenerty
Feeds and Speeds	Speed and Feed Calculator	Brian Barker
Key way	Slot and Keyway	Brian Barker
Milling 2D	Milling 2D with radius linking	Olivier ADLER

Εικόνα 3.6: Wizards

Σε αυτή την εικόνα φαίνονται οι πολλές διεργασίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτό το πρόγραμμα. Μεταξύ άλλων φαίνεται η εύρεση του κέντρου ενός κύκλου, η κοπή ενός τεμαχίου σε μορφή κύκλου ή τόξου, το άνοιγμα μίας τρύπας, και ακόμα και η κοπή ενός οδοντωτού τροχού.

Για τη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιείται μόνο ο Digitize Wizard.

File Config Function Clg's View Wizards Operator Plugin Control Help

Mach2
ArtSoft

Digitizing Wizard

Press Enter after entry

Width (X) of digitizing area **+10.0000**

Height (Y) of digitizing area **+10.0000**

Z axis travel height **+5.0000**

Z axis Probe Depth **0000.0000**

X Stepper **+0.0040**

Y Stepper **+1.0000**

Feedrate **+100.00**

Press here to test figures

 The File size from the entries so far is
+75005 lines

Εικόνα 3.7: Digitizing Wizard

Συμπληρώνουμε τα μεγέθη στα κουτιά ανάλογα με το αντικείμενο που θέλουμε να μελετήσουμε.

Τα 2 πρώτα μεγέθη είναι οι διαστάσεις της επιφάνειας. (από αριστερά προς τα δεξιά, από μπροστά προς τα πίσω)

Το Z axis travel height είναι το μέγιστο ύψος που φτάνει ο αισθητήρας. Αν υπάρχουν μεταβολές του τεμαχίου στον άξονα Z τότε πρέπει να αυξήσουμε τον αριθμό σε αυτό το κουτί. (περισσότερο από αυτές τις μεταβολές). Το Z axis probe depth χρησιμοποιείται σε καλούπια για μέτρηση σε βάθος από το πιο ψηλό σημείο προς το πιο χαμηλό. Αν η αρχή των αξόνων έχει οριστεί με κατάλληλο τρόπο τότε αυτό το μέγεθος συνήθως ισούται με 0. Τα X και Y stepper δίνουν την απόσταση μεταξύ 2 μετρήσεων. Το Feed rate είναι η ταχύτητα της διαδικασίας μέτρησης.

3.3: Κώδικες

Ο αισθητήρας κινείται με τη χρήση κωδίκων του Mach 3 (G codes και M codes). Για να γίνει σωστά η διαδικασία της μέτρησης πρέπει πρώτα να επιτευχθεί σωστή ευθυγράμμιση των αξόνων και ορισμός της αρχής τους. Η αρχή των αξόνων πρέπει να οριστεί ως το άκρο του αισθητήρα.

Γενικά, οι G codes (Geometric Code) εκτελούνται από τη μηχανή CNC και χειρίζονται την κίνηση του εργαλείου (αισθητήρα), όπως ταχύτητα, ορισμός μονάδων μέτρησης, επιλογή επιπέδου ή άξονα, ορισμός μήκους εργαλείου και άλλα. Όπως φαίνεται από το όνομα, χρησιμοποιούνται για την αλλαγή της γεωμετρικής θέσης του εργαλείου σχετικά με το υλικό που εξετάζεται. Μια εντολή που θα χρησιμοποιηθεί πολύ είναι η G0. Με αυτή την εντολή το εργαλείο κινείται στη θέση που του ορίζεται. Για παράδειγμα η εντολή G0 X0 θα μετακινήσει τον αισθητήρα στη θέση X=0 κρατώντας τη θέση του στους άλλους 2 άξονες σταθερή. Η εντολή G1 λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο, αλλά η G0 είναι πιο γρήγορη (Rapid Positioning).

Οι M codes (Machine Code) ελέγχουν τις περισσότερες συναρτήσεις ελέγχου όπως λιπαντικά, ψυκτικά, αντικατάσταση εργαλείου, κυκλώματα ασφαλείας, ταχύτητα περιστροφής ενός κοπτικού εργαλείου, σταμάτημα και άλλα. Αυτοί οι κώδικες γράφονται σε ξεχωριστό επεξεργαστή ο οποίος επικοινωνεί με τον επεξεργαστή του CNC με κοινό δίαυλο.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι λειτουργίες του κάθε G code που περιέχεται στο Mach 3.

Summary of G-codes	
G0	Rapid positioning
G1	Linear interpolation
G2	Clockwise circular/helical interpolation
G3	Counterclockwise circular/Helical interpolation
G4	Dwell
G10	Coordinate system origin setting
G12	Clockwise circular pocket
G13	Counterclockwise circular pocket
G15/G16	Polar Coordinate moves in G0 and G1
G17	XY Plane select
G18	XZ plane select
G19	YZ plane select
G20/G21	Inch/Millimetre unit
G28	Return home
G28.1	Reference axes
G30	Return home
G31	Straight probe
G40	Cancel cutter radius compensation
G41/G42	Start cutter radius compensation left/right
G43	Apply tool length offset (plus)
G49	Cancel tool length offset
G50	Reset all scale factors to 1.0
G51	Set axis data input scale factors
G52	Temporary coordinate system offsets
G53	Move in absolute machine coordinate system
G54	Use fixture offset 1
G55	Use fixture offset 2
G56	Use fixture offset 3
G57	Use fixture offset 4
G58	Use fixture offset 5
G59	Use fixture offset 6 / use general fixture number
G61/G64	Exact stop/Constant Velocity mode
G68/G69	Rotate program coordinate system
G70/G71	Inch/Millimetre unit
G73	Canned cycle - peck drilling
G80	Cancel motion mode (including canned cycles)
G81	Canned cycle - drilling
G82	Canned cycle - drilling with dwell
G83	Canned cycle - peck drilling
G84	Canned cycle - right hand rigid tapping
G85/G86/G88/G89	Canned cycle - boring
G90	Absolute distance mode
G91	Incremental distance mode
G92	Offset coordinates and set parameters
G92.x	Cancel G92 etc.
G93	Inverse time feed mode
G94	Feed per minute mode
G95	Feed per rev mode
G98	Initial level return after canned cycles
G99	R-point level return after canned cycles

Εικόνα 3.8: G codes

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην εντολή G31: “Straight probe”

Με αυτή την εντολή ο αισθητήρας κινείται σε ευθεία γραμμή, αν και είναι δυνατή και η περιστροφή του. Το σημείο 0 (το άκρο του αισθητήρα) κινείται με ρυθμό με ορισμένο Feed Rate προς ένα σημείο που επίσης έχει οριστεί. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, δηλαδή για τη μέτρηση ενός πλήθους σημείων κάποιου μοντέλου, ο κώδικας που χρησιμοποιείται αποτελείται από μια ακολουθία εντολών G31,G0,G0

Παράδειγμα:

Αν ο αισθητήρας κινείται κατά τον άξονα X με βήμα 10mm και μέγιστο βάθος Z 100mm, τότε το αρχικό κομμάτι του κώδικα θα έχει την εξής μορφή:

```
G31 Z-100  
G0 Z0  
G0 X10 Y0 Z0  
G31 Z-100  
G0 Z0  
G0 X20 Y0 Z0  
G31 Z-100  
G0 Z0  
G0 X30 Y0 Z0
```

Αυτό σημαίνει ότι αρχικά ο αισθητήρας θα κατέβει μέχρι να βρει επαφή με το μοντέλο, ή μέχρι το Z να φτάσει τα -100mm (100mm κάτω από το σημείο αναφοράς), μετά θα ανέβει στην αρχική του θέση, και στη συνέχεια θα μετακινηθεί ως προς τον άξονα X, κατά το δεδομένο βήμα. Εκεί θα επαναλάβει την ίδια διαδικασία μέχρι να φτάσει στο τελικό X που του έχει οριστεί. Όταν γίνει αυτό η εντολή θα έχει τη μορφή G0 X100 Y10 Z0 (αν το τελικό X είναι 100mm και το βήμα στον άξονα Y είναι 10mm).

Αν και δε χρησιμοποιούνται για αυτές τις μετρήσεις, οι κώδικες M-codes έχουν και αυτοί μεγάλη σημασία στη χρήση του CNC, κυρίως σε διαδικασίες κοπής, όπου χρειάζεται περιστροφή ή αλλαγή του κοπτικού εργαλείου και χρήση ψυκτικού.

Στον πίνακα της εικόνας 3.9 φαίνονται οι M codes που μπορούν να εκτελεστούν από το Mach 3:

M-code	Meaning
M0	Program stop
M1	Optional program stop
M2	Program end
M3/4	Rotate spindle clockwise/counterclockwise
M5	Stop spindle rotation
M6	Tool change (by two macros)
M7	Mist coolant on
M8	Flood coolant on
M9	All coolant off
M30	Program end and Rewind
M47	Repeat program from first line
M48	Enable speed and feed override
M49	Disable speed and feed override
M98	Call subroutine
M99	Return from subroutine/repeat

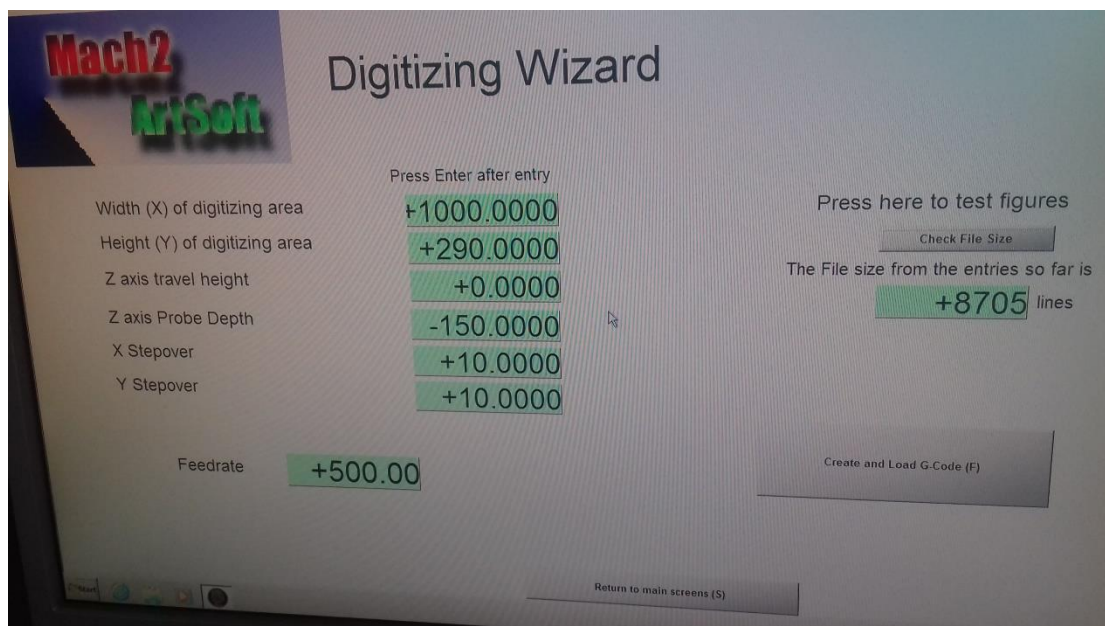
Εικόνα 3.9: M codes

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, οι διεργασίες που εκτελούνται από τα M Codes περιλαμβάνουν χρήση ψυκτικού υγρού, αλλαγή εργαλείου, και διάφορες εντολές σχετικές με την περιστροφή του εργαλείου. Στην περίπτωση του αισθητήρα πράγματι καμία από αυτές δε χρησιμεύει, ενώ σε μια διαδικασία κοπής θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμοι

4: Διαδικασία μέτρησης σημείων

Για τη μελέτη της ακρίβειας του αισθητήρα θα μετρηθούν οι συντεταγμένες 3 μοντέλων. Ο αισθητήρας θα περάσει από αυτά τα μοντέλα με βήματα στους άξονες x και y που θα επιλεγθούν από το χρήστη του CNC.

Η διαδικασία της μελέτης γίνεται με την επιλογή κάποιων παραμέτρων, οι οποίες φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα . Αυτές είναι: το μήκος και πλάτος της επιφάνειας (δηλαδή το μέγιστο x και y που θα μετρήσει ο αισθητήρας), το αρχικό ύψος z και το μέγιστο βάθος που θα φτάσει ο αισθητήρας πριν σταματήσει για να συνεχίσει στο επόμενο σημείο, τα βήματα στους άξονες x και y και η ταχύτητα της μηχανής.



Εικόνα 4.1: Περιβάλλον επιλογής παραμέτρων μέτρησης

Όταν πραγματοποιηθεί επαφή, ο αισθητήρας θα επιστρέψει στο αρχικό ύψος z και θα συνεχίσει στο επόμενο σημείο. Η κίνηση γίνεται με μορφή "φιδιού", δηλαδή κρατάει σταθερό το y, μελετάει όλα τα σημεία στον άξονα x για το συγκεκριμένο y, και μετά μετακινείται ως προς y και μετράει τα σημεία στον x αντίστροφα, μέχρι να φτάσει στο μέγιστο y. Κάθε φορά που ο αισθητήρας καταγράφει τις συντεταγμένες ενός σημείου, αυτές εισάγονται σε ένα αρχείο .txt και ο αισθητήρας δίνει μια ένδειξη (οπτική με LED και ηχητική) πριν συνεχίσει στο επόμενο σημείο.



Εικόνα 4.2: Ένδειξη επαφής αισθητήρα με μοντέλο

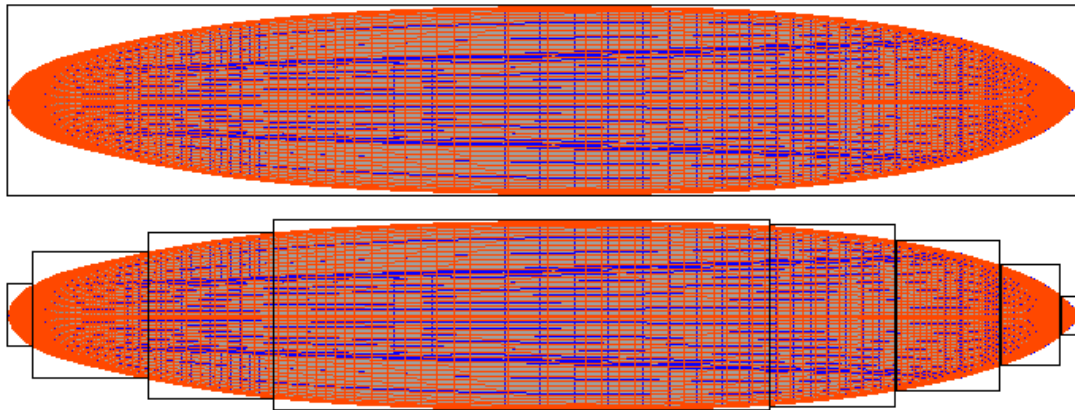
Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της μέτρησης, πρέπει να επιτευχθεί η σωστή ευθυγράμμιση του μοντέλου με τον άξονα x της μηχανής. Επίσης, πρέπει το τεμάχιο να είναι σταθερό, καθώς η επαφή του με τον αισθητήρα ασκεί κάποια δύναμη, η οποία θα μπορούσε να το μετακινήσει, έστω και ελάχιστα, αλλάζοντας έτσι τα αποτελέσματα του πειράματος κατά τη διάρκειά του.

Επιπλέον, πρέπει να επιλεγθούν τα κατάλληλα βήματα της διαδικασίας. Αν το βήμα είναι πολύ μεγάλο, τότε υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος.

Οι νομείς που θα σχεδιαστούν στο Rhino με βάση τα σημεία θα έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα αν ο ένας νομέας έχει αρκετά μεγάλο σφάλμα, ένα μεγάλο τμήμα της επιφάνειας θα έχει λάθος σημεία αναφοράς ή έντονη αλλαγή στην καμπυλότητα.

Αντίθετα, αν το βήμα είναι πολύ μικρό, τότε η διαδικασία θα διαρκέσει πολύ περισσότερο χρόνο, χωρίς να υπάρξει ουσιαστική αλλαγή στο αποτέλεσμα.

Μια λύση για το πρόβλημα του χρόνου είναι και η διαίρεση της μελέτης του μοντέλου σε τμήματα. Αντί για να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση κατά μήκος του μοντέλου λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο πλάτος του, μπορούν να γίνουν περισσότερες μικρές μετρήσεις, οι οποίες θα έχουν διαφορετικό μέγιστο πλάτος (μικρότερο στην πλώρη και στην πρύμνη, ίσο με το μέγιστο κοντά στο κέντρο), διαφορετικό βήμα (μεγαλύτερο βήμα στα τμήματα της επιφάνειας με λιγότερο έντονες αλλαγές, μικρότερο σε τμήματα με καμπυλότητα), και διαφορετικό αρχικό ύψος ή μέγιστο βάθος.



Εικόνα 4.3: Επιφάνεια μέτρησης: ολόκληρο το μοντέλο (πάνω), σε τμήματα (κάτω)

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, στην πρώτη περίπτωση υπάρχει ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας της μέτρησης στο οποίο ο αισθητήρας δε θα έρθει σε επαφή με το μοντέλο. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας θα φτάσει μέχρι το μέγιστο βάθος που του έχει ανατεθεί, με αποτέλεσμα μεγάλη καθυστέρηση. Επιπλέον, η κίνησή του στον άξονα z είναι πιο αργή από την αντίστοιχη στους άλλους 2 άξονες, προκαλώντας περαιτέρω αύξηση του χρόνου της μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή και η επιλογή μικρότερου βήματος στην πλώρη και στην πρύμνη του κάθε μοντέλου, όπου η γεωμετρία είναι πιο πολύπλοκη.

4.1: 1^ο μοντέλο: Ιστιοσανίδα

Το πρώτο από τα 3 μοντέλα που μελετήθηκε είναι μια ιστιοσανίδα μήκους 3.72m και μέγιστου πλάτους 31.5cm. Με βάση αυτές τις διαστάσεις θα επιλεγθούν και τα όρια της μέτρησης.



Εικόνα 4. 4: Ιστιοσανίδα

Αρχικά πρέπει να γίνει ευθυγράμμιση της σανίδας ως προς τον άξονα x της μηχανής, και η τοποθέτησή της με τρόπο ώστε η ίσαλος να είναι παράλληλη στον άξονα z της μηχανής. Αυτή θα πραγματοποιηθεί αρχικά με μια οριζόντια ακτίνα laser κατά μήκος της σανίδας.



Εικόνα 4.5: laser για το σχεδιασμό ισάλου

Στη συνέχεια σχεδιάζεται μια ίσαλος με βάση την ακτίνα laser και αυτή η ίσαλος θα χρησιμοποιηθεί για την ευθυγράμμιση του μοντέλου. Η ίδια διαδικασία ευθυγράμμισης γίνεται και για τη σχεδίαση της κεντρικής γραμμής (centerline) κατά μήκος του άξονα x για $y=0$. Η σχεδίαση της κεντρικής γραμμής γίνεται και για τις 2 μεριές της σανίδας.

Μετά τη σχεδίαση των 2 κεντρικών γραμμών και της ισάλου, η σανίδα μπορεί να τοποθετηθεί στο τραπέζι του CNC. Με την εφαρμογή των κατάλληλων στηριγμάτων, η σανίδα τοποθετείται έτσι ώστε η ισάλος να είναι παράλληλη με τον άξονα z. Η ευθυγράμμιση ως προς x γίνεται με τη χειροκίνητη μετακίνηση του αισθητήρα κατά μήκος της σανίδας, και μετακίνηση της σανίδας έτσι ώστε ο αισθητήρας βρίσκεται στο ίδιο πλάτος με την centerline. Επίσης τοποθετήθηκαν βαρίδια πάνω στη σανίδα για να αποτρέψουν την κίνηση ή περιστροφή της σανίδας όταν δέχεται δύναμη από τον αισθητήρα, ή κατά λάθος.



Εικόνα 4.6: Τοποθέτηση της ευθυγραμμισμένης σανίδας

Το πρώτο βήμα μετά τη σωστή τοποθέτηση της σανίδας είναι ο ορισμός της αρχής των αξόνων. Ο αισθητήρας θα τοποθετηθεί αρχικά ακριβώς πάνω από το πρώτο σημείο της πλώρης, και σε κάποιο επιθυμητό ύψος. Η αρχή των αξόνων θα θεωρηθεί το άκρο της βελόνας του αισθητήρα, και είναι διαφορετική από την αρχή των αξόνων της μηχανής. Αφού η μέτρηση των σημείων γίνεται σε τμήματα, η αρχή του άξονα x θα είναι διαφορετική κάθε φορά. Το ίδιο ισχύει και για τον άξονα z, αφού για τη μείωση του χρόνου είναι προτιμητέο να ελαχιστοποιηθεί η κίνηση. Αυτό σημαίνει ότι το μηδενικό ύψος θα είναι χαμηλότερο στην πρύμνη και ψηλότερο στην πλώρη. Η σανίδα είναι συμμετρική ως προς τον κεντρικό άξονα x, άρα μετρήθηκε μόνο η μισή και η υπόλοιπη δημιουργήθηκε στη συνέχεια με mirror. Για το πάνω μέρος της σανίδας, η διαίρεση έγινε σε 5 τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι για x από 0 μέχρι 1000mm, με βήμα 10mm σε x και y. Παρατηρήθηκε ότι το βήμα των 10mm στον άξονα x ήταν πολύ μικρό, και η μέτρηση ενός μέτρου στην πρύμνη έπρεπε να διαιρεθεί, επειδή το πλάτος αλλάζει απότομα κατά το μήκος, άρα για μεγάλο μέρος της μελέτης ο αισθητήρας έφτανε στο μέγιστο βάθος. Ως

αποτέλεσμα η μέτρηση ενός μόνο μέτρου (μήκος) της σανίδας κράτησε περίπου 5 ώρες. Το δεύτερο τμήμα είναι για x από 1000 μέχρι 3000mm, με βήμα 100mm σε x και 10 σε y . Αυτό το τμήμα της σανίδας έχει πολύ πιο μικρή καμπυλότητα όσο μεταβάλλεται το x . Για αυτό το λόγο το βήμα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο χωρίς να επηρεάσει αρνητικά τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Το τρίτο τμήμα είναι από 3000mm μέχρι 3450mm με βήμα 25mm στον άξονα x
Το τέταρτο τμήμα είναι από 3450mm μέχρι 3600 mm και έχει ίδιο βήμα με το προηγούμενο. Το τελευταίο τμήμα είναι από 3600mm μέχρι το άκρο με βήμα 10mm στον x και 5mm στον y . Ο λόγος είναι ότι εκεί βρίσκεται η “μύτη” της σανίδας, η οποία πρέπει να περιγραφεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια για να σχηματιστεί η περιφέρειά της. Η σανίδα έχει ένα ακόμα τελευταίο σημείο στο άκρο. Αυτό μετρήθηκε μετακινώντας το ακρο του αισθητήρα προς τη μύτη της σανίδας αργά, μέχρι να έρθουν σε επαφή. Οι συντεταγμένες του άκρου της βελόνας αναγράφονται κάθε στιγμή στο Mach3, ακόμα και όταν δεν τρέχει κάποιο κώδικα. Με αυτές τις συντατεγμένες δημιουργήθηκε ένα ακόμα σημείο στο Rhino για να σχηματιστούν οι καμπύλες που απαιτούνται.

Στη συνέχεια, από τη στιγμή που η σανίδα δεν είναι συμμετρική ως προς την ίσαλο, έπρεπε να μετρηθεί και η κάτω μεριά της. Η κεντρική γραμμή έχει ήδη σχηματιστεί και σε αυτή τη μεριά από το προηγούμενο βήμα, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια ίσαλος για την ευθυγράμμιση ως προς τον άξονα z . Ακολουθώντας την ίδια τεχνική με το πάνω μέρος, η σανίδα τοποθετήθηκε, ευθυγραμμίστηκε και στηρίχτηκε για να πραγματοποιηθεί η επόμενη σειρά μετρήσεων. Σημειώνεται ότι η μορφή της επιφάνειας της σανίδας είναι πολύ διαφορετική από αυτή της πάνω μεριάς. Δεν υπάρχει έντονη καμπυλότητα στα άκρα, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολο να μετρηθεί. Ωστόσο, κατά μήκος της ιστιοσανίδας παρουσιάζεται μια γωνία της οποίας τα σημεία δεν πέφτουν πάντα στο ίδιο πλάτος με αυτό που μετράει το όργανο. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με καταγραφή των σημείων της γωνίας που ο αισθητήρας μέτρησε με ακρίβεια, δηλαδή βρήκε επαφή με την κορυφή της γωνίας. Περνώντας μια καμπύλη από αυτά τα γνωστά σημεία, είναι δυνατό να βρεθούν τα αντίστοιχα σημεία καθ'όλο το μήκος της σανίδας.



Εικόνα 4.7: Τοποθέτηση σανίδας για μέτρηση της αντίθετης μεριάς

Όμοια με την πάνω μεριά, ορίζεται αρχικά η αρχή των αξόνων ως το άκρο της πρύμνης για τους άξονες x και y , ενώ το z θα μεταβάλλεται κατάλληλα για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος.

Αυτή τη φορά η σανίδα διαιρέθηκε σε 7 τμήματα, επειδή η μείωση του μεγίστου πλάτους σε μια μέτρηση μειώνει το χρόνο της σημαντικά. Το πρώτο τμήμα είναι από 0 μέχρι 300mm, με βήμα 25mm στον x και 10mm στον y . Το μικρότερο μετρούμενο μήκος και μέγιστο πλάτος σε σχέση με τη μέτρηση της πλώρης της πάνω μεριάς έφερε σημαντική μείωση του χρόνου, και ίδια ποιότητα αποτελεσμάτων της μέτρησης. Το δεύτερο τμήμα είναι από 300mm μέχρι 600mm, με ίδιο βήμα με το προηγούμενο. Το τρίτο και το τέταρτο τμήμα είναι τα μεγαλύτερα, από 600mm μέχρι 1600mm και από 1600mm μέχρι 2600mm αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις το βήμα ήταν 100mm στον άξονα x και 15mm στον y . Σε αυτή την έκταση της επιφάνειας το πλάτος παραμένει σχεδόν σταθερό, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η επιλογή ενός μεγίστου πλάτους για το κάθε τμήμα χωρίς ο αισθητήρας να μετράει το κενό. Το πέμπτο τμήμα είναι από 2600mm μέχρι 3200mm, με βήμα 60mm στον άξονα x και 15mm στον άξονα y . Το επόμενο τμήμα είναι από 3200mm μέχρι 3500mm, με βήμα 30mm στον άξονα x και 15mm στον άξονα y . Τέλος, το τελευταίο τμήμα της πλώρης είναι από 3500mm μέχρι το τέλος, με βήμα 20mm στον άξονα x και 10mm στον άξονα y . Όπως παρατηρείται για άλλη μια φορά, το βήμα είναι πιο μεγάλο κοντά στο κέντρο της επιφάνειας και μικρότερο όσο πλησιάζει στα άκρα. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι αναγκαίο να περιγραφεί η περιφέρεια της επιφάνειας, και για να γίνει αυτό πρέπει να μετρηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία που βρισκονται ακριβώς στην

περιφέρεια. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή μικρότερου βήματος σε x και y , αλλά έχει αρκετά πιθανά σφάλματα, τα οποία θα συζητηθούν σε επόμενη ενότητα.

4.2: 2^ο μοντέλο: Βάρκα

Το 2^ο μοντέλο που μετρήθηκε είναι μια βάρκα με μήκος και 1.88m και μέγιστο πλάτος 32cm.



Εικόνα 4.8: Μοντέλο βάρκας

Σε αντίθεση με την ιστιοσανίδα, τα σημεία που πρέπει να μετρηθούν στην επιφάνεια της βάρκας είναι όλα στη μια μεριά. Επίσης, αφού η επιφάνεια της βάρκας είναι επίπεδη, μπορεί να τοποθετηθεί χωρίς να απαιτείται επιπλέον στήριξη ή ευθυγράμμιση. Για αυτό το μοντέλο τοποθετείται στο τραπέζι ακριβώς όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, και απλά ευθυγραμμίζεται ως προς τον άξονα x . Για ασφάλεια χρησιμοποιούνται βάρη που αποτρέπουν την κίνηση του μοντέλου. Όπως και η σανίδα, έτσι και η βάρκα είναι συμμετρική ως προς τον άξονα x , άρα μελετάται η μισή επιφάνειά της και η υπόλοιπη δημιουργείται με την εντολή `mirror`.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζει η γεωμετρία αυτού του μοντέλου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όπως φαίνεται, ο καθρέφτης (`transom`) είναι αδύνατο να μετρηθεί από τον αισθητήρα, αφού αυτός μετακινείται από πάνω προς τα κάτω και η επιφάνεια έχει φορά προς τα μέσα. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η μέτρηση κάποιων περιφερειακών σημείων του καθρέφτη, με ιδιαίτερη σημασία στο

τελευταίο σημείο του, δηλαδή αυτό που βρίσκεται στο ύψος του καταστρώματος. Αυτή η επιφάνεια είναι επίπεδη, άρα δεν είναι δύσκολο να δημιουργηθεί στο Rhino γνωρίζοντας μερικά από τα σημεία της περιφέρειάς της.



Εικόνα 4.9: Επιφάνεια καθρέφτη

Ένα άλλο πρόβλημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η έντονη καμπυλότητα, ειδικά στην περιοχή της πλώρης.

Η γάστρα σχηματίζει μεγάλη γωνία με το επίπεδο xy , με αποτέλεσμα μεγάλη πιθανότητα σφάλματος στα αποτελέσματα. Αυτό το πρόβλημα λύνεται σχεδιαστικά, αλλά λόγω αυτής της μεγάλης γωνίας τα σημεία που μετράει ο αισθητήρας σε αυτή την περιοχή έχουν μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα. Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η μορφή της γάστρας σε αυτή την περιοχή. Από αυτή την όψη φαίνεται ότι ο αισθητήρας θα καταγράψει ικανοποιητικά τα σημεία που βρίσκονται κοντά στην κεντρική γραμμή, αλλά για μεγαλύτερα y η μέτρηση θα έχει μικρότερη ακρίβεια, και κάποιο τμήμα αυτής της επιφάνειας δε θα μετρηθεί καθόλου. Στο κεφάλαιο 6 θα περιγραφεί περισσότερο το σφάλμα της μέτρησης όταν η επιφάνεια έχει μεγάλες γωνίες. Για μεγαλύτερες ταχύτητες του αισθητήρα αυτό το σφάλμα είναι μεγαλύτερο, και στη συγκεκριμένη μέτρηση η επιλογή μικρών ταχυτήτων θα προκαλούσε μεγάλη αύξηση στο χρόνο εκτέλεσης, αφού ο αισθητήρας θα έπρεπε να κατέβει αργά μέχρι ένα αρκετά μεγάλο βάθος.



Εικόνα 4.10: Καμπυλότητα πλώρης μοντέλου

Η μέτρηση έγινε και πάλι μέσω της διαίρεσης του μοντέλου σε 5 τμήματα. Το πρώτο είναι από 0 μέχρι 500mm, με βήμα 50mm στον άξονα x και 10mm στον y. Εκτός από τα σημεία που καταγράφονται από αυτή την επαναληπτική διαδικασία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πρέπει να μετρηθούν τα σημεία που βρίσκονται στην περιφέρεια της επιφάνειας του καθρέφτη. Το δεύτερο τμήμα είναι από 500mm μέχρι 1100mm, με 50mm βήμα στον άξονα x και 15mm στον άξονα y. Το επόμενο τμήμα φτάνει μέχρι τα 1400mm, με το ίδιο ακριβώς βήμα. Μέχρι τώρα οι μεταβολές της επιφάνειας συναρτήσει του x δεν είναι τόσο μεγάλες, και για αυτό το λόγο το βήμα των 50 χιλιοστών είναι ικανοποιητικό. Όσο ο αισθητήρας πλησιάζει την πλώρη του μοντέλου, η γεωμετρία αρχίζει και κλείνει, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερο βήμα στους 2 άξονες. Το τέταρτο τμήμα μέτρησης είναι από 1400mm μέχρι 1700mm, με βήμα 30mm στον άξονα x και 10mm στον άξονα y. Προσοχή δίνεται σε κάποιες προεξοχές που βρίσκονται στην επιφάνεια της γάστρας, οι οποίες φαίνονται και στην παραπάνω εικόνα. Αυτές βρίσκονται στη διάσταση $x=1520\text{mm}$, και για αυτό οι μετρήσεις που καταγράφηκαν για αυτό το x αγνοούνται, αφού πολλές από αυτές σταμάτησαν στις προεξοχές και όχι στην ίδια τη γάστρα. Τέλος, η τελευταία μέτρηση γίνεται από 1700mm μέχρι το άκρο της πλώρης. Το βήμα σε αυτή την περίπτωση είναι 20mm στον άξονα x και 10mm στον άξονα y. Για ασφάλεια, το τελευταίο σημείο της γάστρας μετριέται ξεχωριστά, επειδή η διαδικασία μετράει ανά 20mm, ενώ το άκρο της πλώρης μπορεί να μη βρίσκεται σε ακέραιο μήκος.

4.3: 3^ο μοντέλο: Λεπτόγραμμα σκάφος

Η τελευταία μέτρηση έγινε πάνω σε ένα λεπτόγραμμα μοντέλο σειράς 60. Το μήκος του είναι περίπου 3.11 μέτρα με μέγιστο πλάτος 20cm.



Εικόνα 4.11: Λεπτόγραμμα μοντέλο

Σημειώνεται ότι αυτό το μοντέλο μετρήθηκε από την πλώρη προς την πρύμνη. Στη μέτρηση των σημείων αυτού του μοντέλου παρουσιάστηκαν κάποιες δυσκολίες. Αρχικά, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, η πλώρη του καταλήγει σε ένα σημείο με $x < 0$, στο οποίο η βελόνα του αισθητήρα δε μπορεί να φτάσει. Για τη μέτρηση αυτού του σημείου, αρχικά γνωρίζουμε ότι η συντεταγμένη y του είναι ίδη με 0 και η συντεταγμένη z είναι το z της ισάλου, το οποίο είναι σταθερό. Για να βρεθεί η συντεταγμένη x του σημείου, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε από πάνω και ευθυγραμμίστηκε με το άκρο χρησιμοποιώντας μια βάση ορθής γωνίας.

Παρόμοιο πρόβλημα παρουσιάστηκε και στην πρύμνη, η οποία έχει μια γεωμετρία που δεν επιτρέπει τη μέτρηση σε κάποιο εύρος μήκους. Αυτή η περιοχή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, και σχεδιάστηκε προσεγγιστικά στο Rhino γνωρίζοντας τα προηγούμενα και επόμενα σημεία, καθώς και τη μορφή της καμπύλης.



Εικόνα 4.12: Πρύμνη λεπτόγραμμου μοντέλου

Τέλος, το γεγονός ότι το πλοίο είναι λεπτόγραμμο προκαλεί δυσκολίες στη μέτρηση κάποιων περιοχών. Για να λυθεί αυτό, πάρθηκαν μερικές επιπλέον μετρήσεις οι οποίες είχαν σημείο αναφοράς με διαφορετικό y , ώστε να μετρηθεί μια περιοχή στα πλάγια για να μη συγκρουστεί το κέλυφος του αισθητήρα με τον πυθμένα του μοντέλου.

Το μοντέλο διαιρέθηκε σε 8 τμήματα κατά το μήκος του, τα οποία μετρήθηκαν από την κεντρική γραμμή του, και 2 επιπλέον τμήματα που μέτρησαν περιοχές σε μεγαλύτερα πλάτη όπου ήταν αδύνατο.

Αρχικά, η πλώρη μετρήθηκε από την αρχή μέχρι τα 130mm μήκους, με βήμα 10mm στον άξονα x και 8mm στον άξονα y . Το επόμενο τμήμα είναι από 130mm μέχρι 330mm, με βήμα 10mm στον άξονα x και 9mm στον άξονα y . Το τρίτο τμήμα επιλέχτηκε από 330mm μέχρι 830mm, με βήμα 25mm στον άξονα x και 15mm στον άξονα y . Το επόμενο τμήμα, το οποίο είναι το μεγαλύτερο, εκτείνεται από τα 830mm μέχρι τα 2230mm, με βήμα 100mm στον άξονα x και 40mm στον άξονα y . Σε αυτή την περιοχή η γεωμετρία ήταν σχεδόν επίπεδη εκτός από τα σημεία κοντά στο μέγιστο πλάτος των 200mm. Στη συνέχεια μετρήθηκε η περιοχή μεταξύ 2230mm και 2630mm, με βήμα 40mm στον άξονα x και 25mm στον άξονα y . Το έκτο τμήμα είναι από 2630mm μέχρι 2830mm, με βήμα 25mm στον άξονα x και 10mm στον άξονα y . Το επόμενο κομμάτι που μετρήθηκε είναι από 2830mm μέχρι 2970mm, με βήμα 14mm στον άξονα x και 8mm στον άξονα y . Τέλος, μετρήθηκε η περιοχή της πρύμνης, από 3010mm μέχρι το τέλος, με βήμα 10mm στον άξονα x και 12mm στον άξονα y .

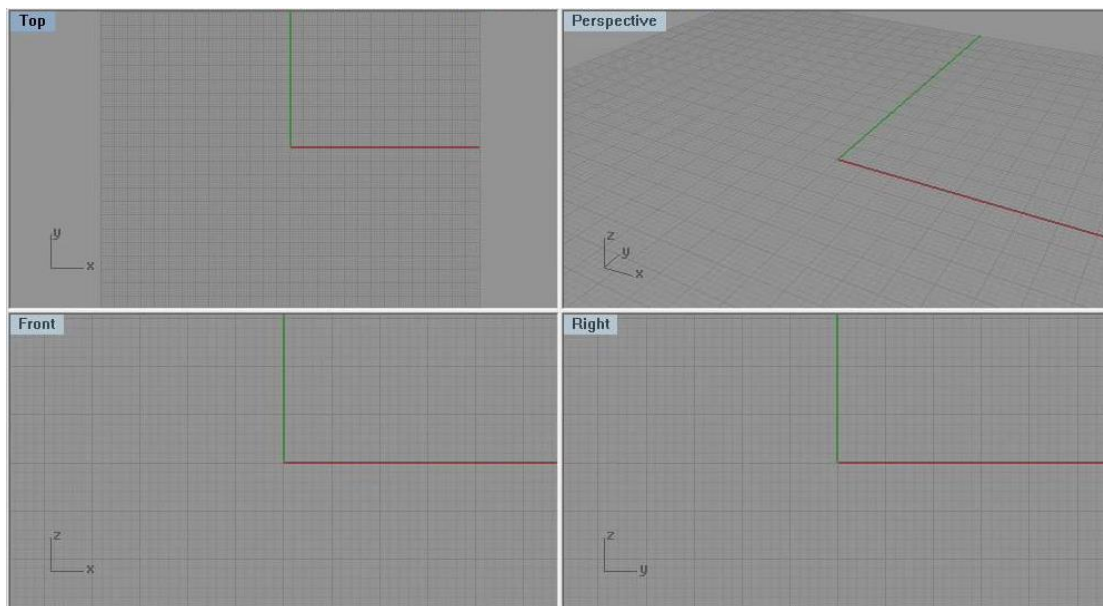
Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα κομμάτι από 2970mm μέχρι 3010mm η οποία δε μετρήθηκε. Όπως αναφέρθηκε πριν, ήταν αδύνατη η πρόσβαση του αισθητήρα σε αυτά τα σημεία. Ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα θα ήταν η χρήση μεγαλύτερης βελόνας.

Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν θεωρώντας ως μηδενικό γ τον κεντρικό άξονα του μοντέλου. Για να μετρηθεί όμως ολόκληρο το σκάφος χρειάστηκαν και 2 επιπλέον μετρήσεις στις περιοχές κοντά στην πρύμνη, για μεγαλύτερα πλάτη.

Η πρώτη από αυτές έγινε από 2655mm μέχρι 2830mm, με βήμα 25mm στον άξονα x και 20mm στον άξονα γ . Σε αυτή τη μέτρηση ως μηδενικό γ θεωρήθηκε αυτό με απόσταση 90mm από τον κεντρικό άξονα, και σαν μέγιστο γ τα 80mm. Αυτό σημαίνει ότι μετρήθηκε η περιοχή των πλατών 90-170mm για το συγκεκριμένο εύρος συντεταγμένων x . Τέλος, μετρήθηκε η περιοχή από 2930mm μέχρι 2970mm, με βήμα 20mm στον άξονα x και 10mm στον άξονα γ . Το μηδενικό γ σε αυτή την περίπτωση είναι στα 50mm, και μετρήθηκαν συντεταγμένες μέχρι τα 150mm. Με αυτές τις 2 μετρήσεις καταγράφηκαν σημεία στην περιφέρεια του μοντέλου, τα οποία δε γινόταν να μελετηθούν αλλιώς. Με αυτό τον τρόπο γνωρίζουμε και τη συντεταγμένη z της ισάλου, αφού πουθενά αλλού δεν έγινε μέτρηση που πλησίασε σε τέτοιο βάθος.

5: Διαδικασία σχεδίασης επιφανειών

Όπως φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διαδικασία των μετρήσεων έδωσε ως αποτέλεσμα ένα σύνολο σημείων. Για τη δημιουργία των επιφανειών απαιτείται επεξεργασία αυτών των σημείων σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα που να υποστηρίζει τρισδιάστατη σχεδίαση και έλεγχο καμπυλότητας. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των επιφανειών των μοντέλων που μετρήθηκαν είναι το Rhinoceros 3D (ή Rhino) των Robert McNeel & Associates. Το Rhino διδάσκεται στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών στα πλαίσια του μαθήματος “Συστήματα CAD/CAM για τη Σχεδίαση και Κατασκευή Πλοίων” του 6^{ου} εξαμήνου. Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τρισδιάστατο σχεδιασμό, ανάλυση καμπυλότητας, επεξεργασία καμπυλών επιφανειών και στερεών και έχει εφαρμογές από μηχανικούς και κατασκευαστές. Το πρόγραμμα λειτουργεί με τη βοήθεια εντολών, παρόμοια με το AutoCAD της Autodesk. Το Rhino είναι πιο κατάλληλο για το σχεδιασμό τρισδιάστατων αντικειμένων, ενώ το AutoCAD επικεντρώνεται σε 2D σχεδιασμό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το περιβάλλον του προγράμματος.



Εικόνα 5.1: Περιβάλλον του προγράμματος Rhinoceros

Όπως φαίνεται, ανά πάσα στιγμή είναι δυνατή η παρακολούθηση του αντικειμένου από 4 όψεις. Οι προκαθορισμένες όψεις η κάτοψη, πρόοψη, πλάγια (από δεξιά) και τρισδιάστατη, η οποία μπορεί να περιστραφεί. Υπάρχει όμως η δυνατότητα αλλαγής οποιασδήποτε από αυτές τις όψεις σε κάποια άλλη, λειτουργία η οποία χρησιμοποιήθηκε πολύ για τη σχεδίαση των επιφανειών.

Επιπλέον, για διευκόλυνση, το πρόγραμμα προσφέρει τη δυνατότητα ανάθεσης “στρωμάτων” (layers) σε κάθε αντικείμενο (σημεία, καμπύλες, επιφάνειες).

Με αυτό τον τρόπο γίνεται να εμφανίζονται στην οθόνη μόνο τα αντικείμενα που θέλουν επεξεργασία. Τα αντικείμενα που εμποδίζουν το χρήστη εξαφανίζονται, χωρίς όμως να διαγράφονται. Μια ακόμα δυνατότητα του Rhinoceros είναι η εισαγωγή σημείων από μορφή txt. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για την εργασία, επειδή τα αποτελέσματα της μέτρησης από το Mach3 παρουσιάζονται σε αρχείο txt. Τα αρχεία αυτά είναι ήδη έτοιμα να εισαχθούν στο Rhino σαν σύνολο σημείων, αλλά στην περίπτωση που χρειάζεται μια εισαγωγή σημείων που δεν ήταν αποτέλεσμα μέτρησης, το αρχείο πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:

```
0.00000,0.00000,-96.00000
9.99891,0.00000,-78.57000
9.99891,0.00000,-78.57000
29.99850,0.00000,-64.63000
39.99919,0.00000,-59.87000
49.99988,0.00000,-55.51800
59.99878,0.00000,-51.84600
59.99878,0.00000,-51.84600
79.99838,0.00000,-45.79400
89.99906,0.00000,-43.21000
99.99975,0.00000,-40.69400
109.99866,0.00000,-38.45000
119.99935,0.00000,-36.54600
129.99825,0.00000,-34.71000
```

Εικόνα 5.2: Συντεταγμένες σημείων σε αρχείο txt

Σε κάθε σειρά δίνονται οι συντεταγμένες ενός σημείου (x,y,z) και είναι έτοιμα να περαστούν στο Rhino με την επιλογή Import.

5.1: 1ο μοντέλο: Ιστιοσανίδα

Αφού τα σημεία της ιστιοσανίδας μετρήθηκαν από τον αισθητήρα, δημιουργήθηκε ένα αρχείο txt για την κάθε μέτρηση (5 για την πάνω μεριά, 7 για την κάτω). Αυτά όμως έχουν διαφορετικό σημείο αναφοράς, με μοναδικό κοινό το y. Αυτό σημαίνει ότι το κάθε σύνολο σημείων που εμφανίζεται, ξεκινάει από την αρχή των αξόνων. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα έχει πραγματοποιηθεί από τη διαδικασία της μέτρησης. Η κάθε μέτρηση ξεκινάει από το ίδιο x που τελείωνε η προηγούμενη, άρα σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα σύνολο (νομέας) κοινών σημείων με ελάχιστη απόκλιση. Με την εντολή Move, γίνεται μετακίνηση του ενός συνόλου σημείων προς ένα άλλο. Για παράδειγμα, η πρώτη μέτρηση έφτανε μέχρι τα 1000mm, και η επόμενη ήταν από 1000mm μέχρι τα 3000mm. Η δεύτερη μέτρηση εμφανίζεται σαν ένα σύνολο σημείων από 0 μέχρι 2000mm. Μετακινώντας

αυτό το σύνολο από το πρώτο σημείο του ($x=0,y=0$) μέχρι το τελευταίο του προηγούμενου συνόλου ($x=1000,y=0$), όλα τα σημεία μετακινούνται στις κανονικές τους θέσεις. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σύνολα σημείων.

Όσο για την κάτω μεριά, εκτός από τη διόρθωση των σημείων αναφοράς, είναι αναγκαία και η αντιστροφή των συντεταγμένων z . Για να γίνει αυτό δημιουργείται προσωρινά ένα επίπεδο παράλληλο στο επίπεδο xy για $z=0$ με την εντολή `Plane > Corner to corner` στο παράθυρο της κάτοψης (παράλληλη στο επίπεδο xy) και στη συνέχεια γίνεται `Mirror` σε όλα τα σημεία της κάτω επιφάνειας ως προς το επίπεδο που δημιουργήθηκε. Τα αρχικά σημεία, δηλαδή αυτά που έχουν θετική διάσταση z , διαγράφονται. Ακόμα, η κάθε μέτρηση κατέγραψε μερικά σημεία που βρίσκονται έξω από την επιφάνεια του σώματος, ή από κάποιο σφάλμα της μηχανής μετρήθηκαν λανθασμένα. Αυτά τα σημεία διαγράφονται. Στη συνέχεια η πάνω με την κάτω μεριά της σανίδας πρέπει να ενωθούν. Το μοναδικό κοινό σημείο τους είναι η αρχή, δηλαδή το σημείο $(0,0,0)$. Μετακινώντας το ένα σύνολο σημείων προς το άλλο ως προς αυτό το σημείο, τα σημεία της επιφάνειας βρίσκονται πια στη σωστή θέση.

Το τελευταίο πράγμα που πρέπει να γίνει πριν ξεκινήσει η σχεδίαση των νομέων και ισάλων είναι η σχεδίαση των οριακών γραμμών. (boundaries) Αυτές θα είναι 2 centerlines (για πάνω και κάτω) και 2 τρισδιάστατες καμπύλες που θα εκτείνονται κατά το μήκος της σανίδας και θα ακολουθούν κάθε φορά το μέγιστο πλάτος. Αυτές οι καμπύλες δημιουργούνται με την εντολή `Curve Through Points-Interpolate`, και κάθε φορά γίνεται η κατάλληλη επιλογή των σημείων τους.

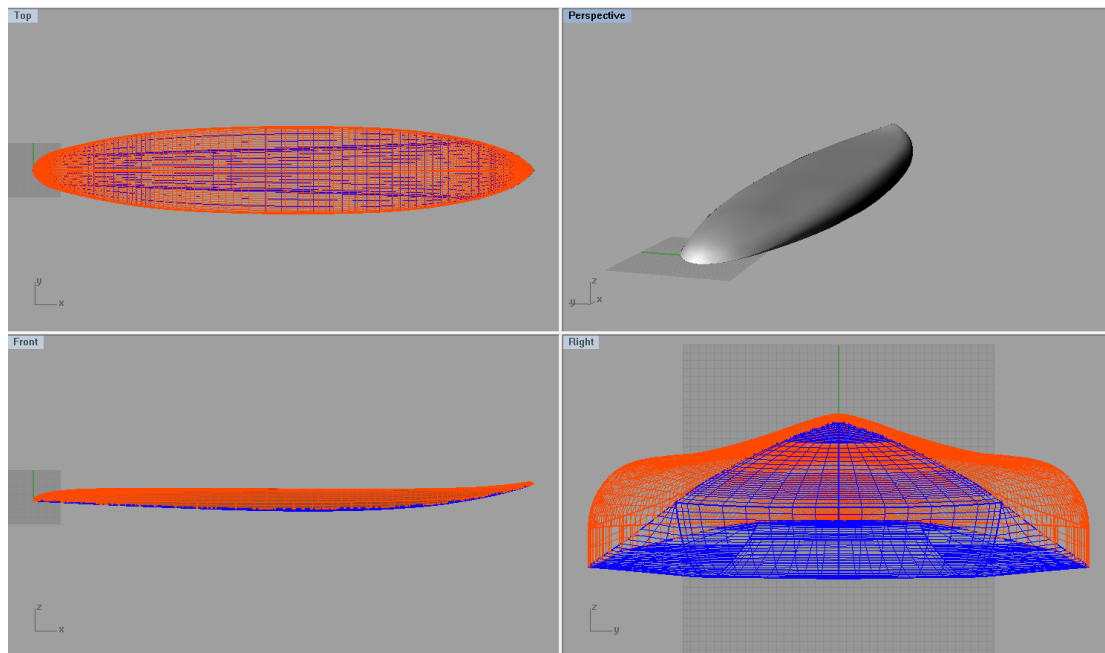
Αυτές οι καμπύλες όμως, δεν έχουν ικανοποιητική καμπυλότητα και χρειάζονται εξομάλυνση. Ένας τρόπος εξομάλυνσης είναι η εντολή `Fair`, αλλά αυτή εξομαλύνει την καμπυλότητα αλλάζοντας παράλληλα και τη μορφή της καμπύλης. Ο καλύτερος τρόπος για την εξομάλυνση αυτών των καμπυλών είναι αρχικά η χρήση της εντολής `Rebuild` για τη μείωση των σημείων αναφοράς της, και στη συνέχεια η εμφάνιση και μετακίνηση των σημείων ένα-ένα, ένω το γράφημα καμπυλότητας είναι εμφανές (`CurvatureGraphOn`), μέχρι η κάθε καμπύλη να έχει ομαλή μορφή, χωρίς μεγάλη απόκλιση από τα αρχικά σημεία. Αφού δημιουργήθηκαν αυτές οι καμπύλες, μπορούν να σχηματιστούν και κάποιοι νομείς. Προφανώς δε χρειάζεται να δημιουργηθούν νομείς για το κάθε μήκος μέτρησης, επιλέγονται απλά κάποιοι νομείς χωρίς μεγάλη μεταξύ τους απόσταση. Το επόμενο βήμα είναι η τομή των νομέων με τις οριακές καμπύλες.

Χρησιμοποιώντας την εντολή `Section` σε αυτές τις καμπύλες γίνεται να εμφανιστούν σημεία που βρίσκονται πάνω σε αυτές, αλλά με διάσταση x ίδια με τον κάθε νομέα που σχηματίστηκε. Στη συνέχεια το πρώτο και το τελευταίο σημείο του κάθε νομέα μετακινούνται με το ποντίκι (χωρίς κάποια εντολή) έτσι ώστε να ταυτίζονται με τα

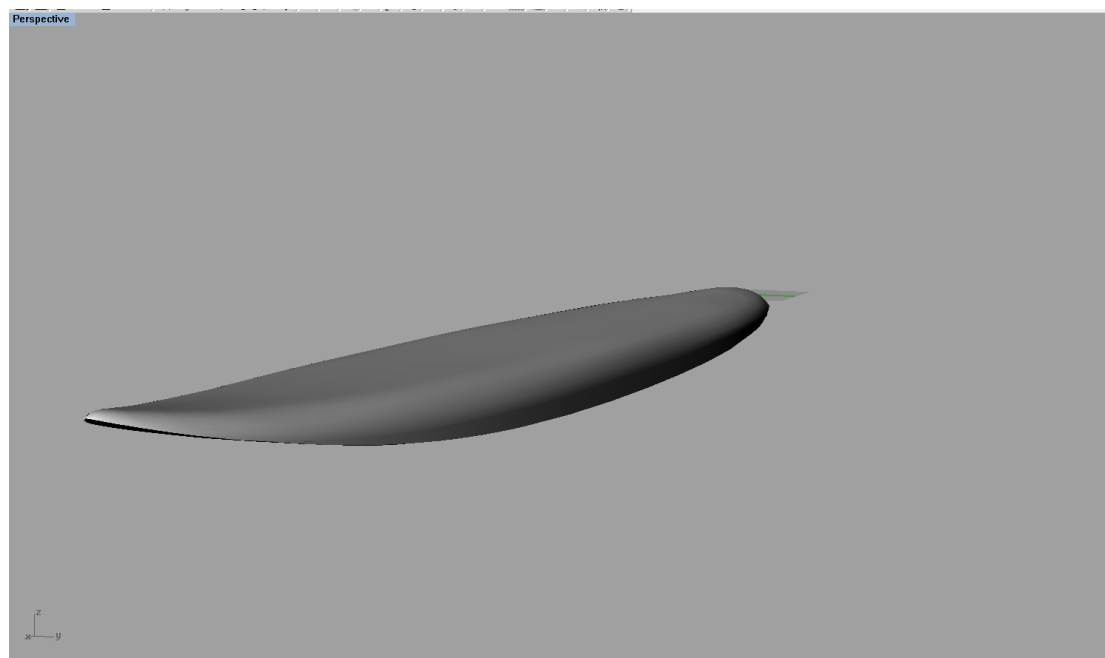
σημεία που εμφανίστηκαν με την εντολή Section. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία για όλους τους νομείς, τα σημεία αυτά μπορούν να διαγραφούν, και με την εντολή Intersect ελέγχεται αν οι οριακές καμπύλες έχουν πράγματι σημεία τομής με τους νομείς. Με αυτό τον τρόπο είναι γνωστό αν κάποιο σημείο έχει μετακινηθεί λανθασμένα ή δεν έχει μετακινηθεί.

Όπως και οι οριακές καμπύλες, προφανώς και οι νομείς δεν έχουν ομαλή καμπυλότητα από την αρχή. Με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε πριν, εξομαλύνονται και οι νομείς. Εκτός από την εξομάλυνση, πρέπει να είναι βέβαιο και ότι ο κάθε νομέας είναι παράλληλος με τον ανάλογο άξονα στα άκρα του. Στα άκρα που φτάνουν στις κεντρικές καμπύλες οι νομείς πρέπει να είναι παράλληλες με τον άξονα y , ενώ στα άλλα άκρα πρέπει να είναι παράλληλες με τον άξονα z . Αυτό συμβαίνει επειδή πρέπει να υπάρχει συνέχεια μεταξύ της κάθε επιφάνειας με την mirrored επιφάνεια, και της πάνω επιφάνειας με την κάτω. Ακόμα και αν ο κάθε νομέας έχει καλή καμπυλότητα, η μετάβαση από νομέα σε νομέα μπορεί να μην είναι ομαλή, και αυτό θα δημιουργήσει προβλήματα στην επιφάνεια. Για αυτό το λόγο δημιουργούνται ίσαλοι χρησιμοποιώντας τις εντολές Section και Curve through points, οι οποίες επίσης εξομαλύνονται. Ακολουθούν κύκλοι εξομάλυνσης νομέων-ισάλων μέχρι όλες οι καμπύλες να είναι ικανοποιητικά ομαλές. Προφανώς αυτό γίνεται ξεχωριστά για την πάνω και την κάτω μεριά της ιστιοσανίδας. Η κάτω μεριά της σανίδας έχει μια ιδιομορφία στην επιφάνειά της, η οποία λύνεται σχηματίζοντας μια ευθεία που περνάει από τα γνωστά σημεία αυτής της “γωνίας”, και προβάλλοντας αυτή την ευθεία στους νομείς. Μετά, ο κάθε νομέας που επηρεάζεται από αυτό διαιρείται σε 2 μέρη (split), με σημείο τομής το σημείο που δημιουργήθηκε από την προβολή της ευθείας. Το κάθε τμήμα του νομέα θα εξομαλύνεται ξεχωριστά, διατηρώντας το κοινό σημείο τους σταθερό ώστε να προεξέχει.

Αφού όλα τα παραπάνω έχουν ολοκληρωθεί, μπορεί να δημιουργηθεί και η επιφάνεια. Η εντολή που παρατηρήθηκε ότι δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν η NetworkSrf (Surface through curve network). Επιλέγοντας όλους τους νομείς και τις οριακές γραμμές της μιας μεριάς, και όχι τα σημεία ή τις ισάλους, δημιουργείται η τελική επιφάνεια. Στη συνέχεια, για να ενωθεί η πάνω με την κάτω επιφάνεια, δημιουργείται μια ακόμα επιφάνεια λαμβάνοντας σαν αναφορά τις άκρες των 2 επιφανειών. Το τελικό αποτέλεσμα της σχεδίασης παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες:

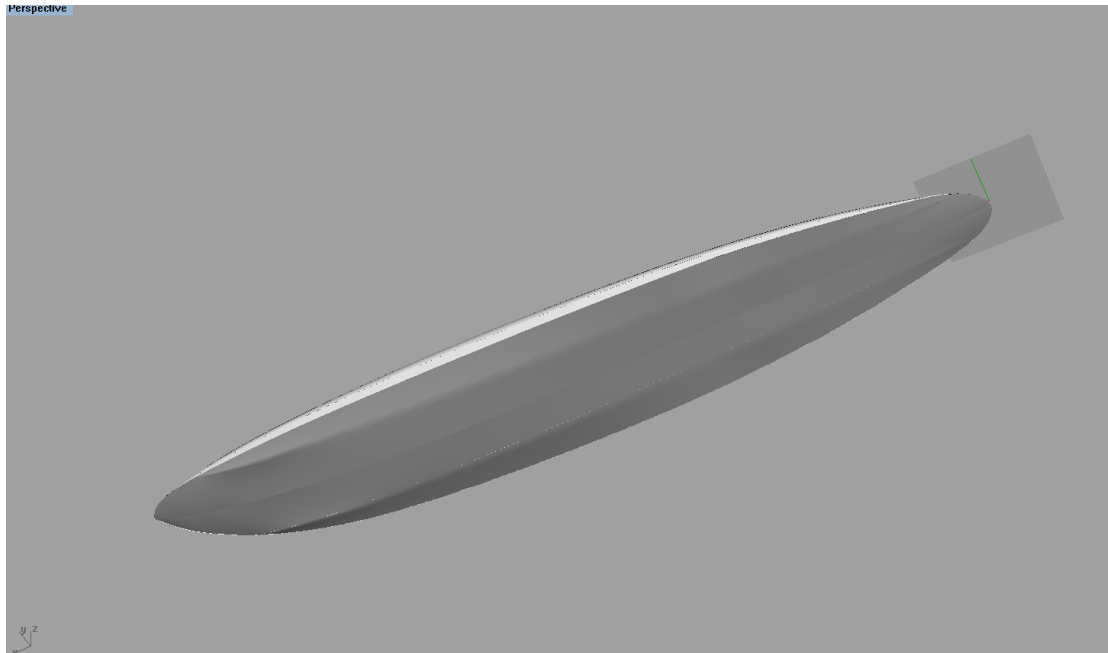


Εικόνα 5.3: Ιστιοσανίδα από όλες τις όψεις

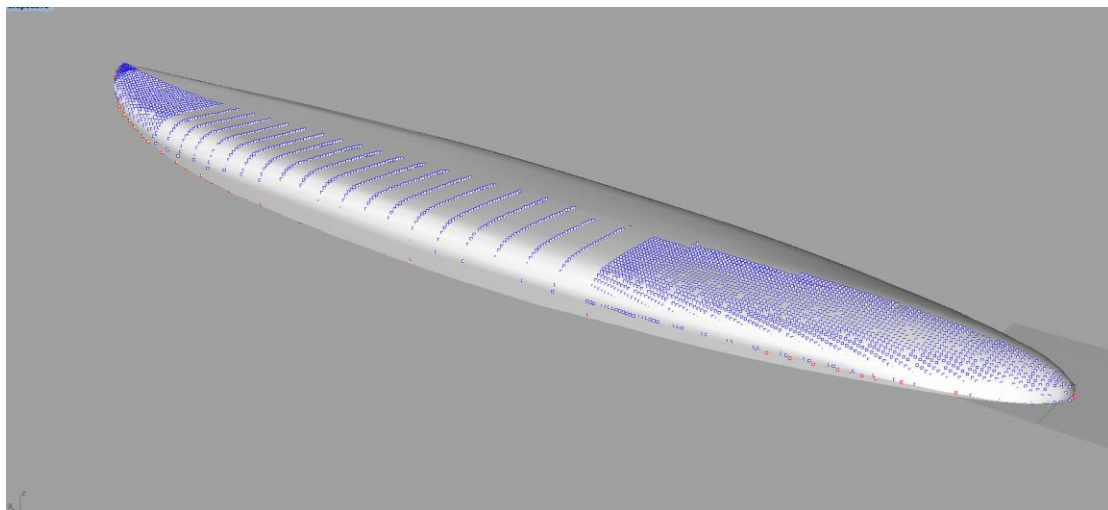


Εικόνα 5.4: Τρισδιάστατη όψη της πάνω μεριάς της σανίδας (Rendered)

Στην εικόνα 5.3 φαίνεται η μορφή της σανίδας από όλες τις όψεις (κάτοψη, πλάγια, μπροστινή και τρισδιάστατη από τυχαία γωνία). Στις 2D όψεις η επιφάνεια φαίνεται σε Wireframe για να είναι πιο εύκολη η επεξεργασία, ενώ στην τρισδιάστατη φαίνεται σε Rendered μορφή, ώστε να φαίνεται πως θα είναι η επιφάνεια στην πραγματικότητα. Στην εικόνα 5.4 φαίνεται μόνο αυτή η όψη σε μεγαλύτερη μεγέθυνση.



Εικόνα 5.5: Τρισδιάστατη όψη της κάτω μεριάς της σανίδας (Rendered)



Εικόνα 5.6: Τρισδιάστατη όψη της πάνω μεριάς της σανίδας με εμφάνιση σημείων

Στην τελευταία από αυτές τις εικόνες φαίνονται με μπλέ χρώμα τα σημεία που μετρήθηκαν από τον αισθητήρα, με βάση τα οποία δημιουργήθηκαν οι επιφάνειες. Φαίνεται ότι τα περισσότερα από τα σημεία είναι “κολλημένα” στην επιφάνεια, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η μέτρησή τους ήταν ικανοποιητική για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου.

Τα σημεία που φαίνεται ότι έχουν μεγαλύτερη απόκλιση είναι αυτά που βρίσκονται στις καμπύλες της σανίδας, πράγμα το οποίο θα συζητηθεί στην επόμενη ενότητα.

5.2: 2^ο μοντέλο: Βάρκα

Το επόμενο μοντέλο που μετρήθηκε, δηλαδή η βάρκα, απαιτεί σχεδίαση μόνο από τη μια πλευρά. Επίσης, το μικρότερο μήκος και πλάτος της οδήγησε σε πολύ μικρότερο χρόνο μέτρησης. Η σχεδιάσή του όμως παρουσίασε μερικά προβλήματα σε σχέση με αυτή της σανίδας.

Η διαδικασία σχεδίασης των καμπυλών και επιφανειών έγινε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Πρώτα σχεδιάστηκε η κεντρική γραμμή και η περιφέρεια, και στη συνέχεια περάστηκαν νομείς από τα σημεία. Το πρώτο πρόβλημα, είναι ότι κατά η βάρκα έχει πιο έντονη καμπυλότητα, άρα ο αισθητήρας τις περισσότερες φορές δε μέτρησε τα σημεία της περιφέρειας. Αυτό το πρόβλημα λύθηκε σημειώνοντας τα σημεία στα οποία ο αισθητήρας πλησίασε περισσότερο στο επιθυμητό σημείο, και στη συνέχεια περνώντας μια έυθεια εφαπτόμενη στον κάθε νομέα που πλησίασε. Η γεωμετρία αυτών των νομέων είναι σχεδόν κάθετη σε αυτά τα σημεία, άρα αυτό δεν προκάλεσε δυσκολίες.

Εκτός από αυτό, τα σφάλματα που παρουσιάστηκαν κατά τη μέτρηση του μοντέλου της βάρκας ήταν μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της ιστιοσανίδας. Αυτό ήταν πιο έντονο στην περιοχή της πλώρης, όπου η γωνία με το επίπεδο xy ήταν πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα το σφάλμα του αισθητήρα επαφής να αυξάνεται. Αυτό το είδος σφάλματος θα συζητηθεί περισσότερο στην επόμενη ενότητα.

Το επόμενο πρόβλημα, το οποίο προκάλεσε δυσκολίες στη σχεδίαση, είναι η γεωμετρία της γάστρας που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

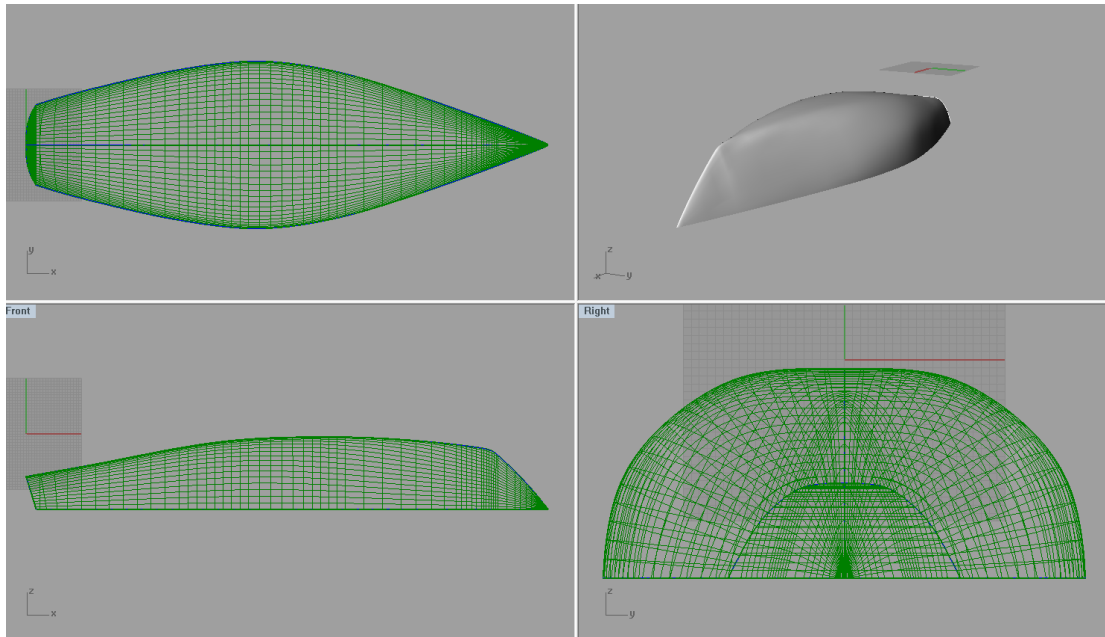


Εικόνα 5.7: Μπροστινή όψη μοντέλου βάρκας

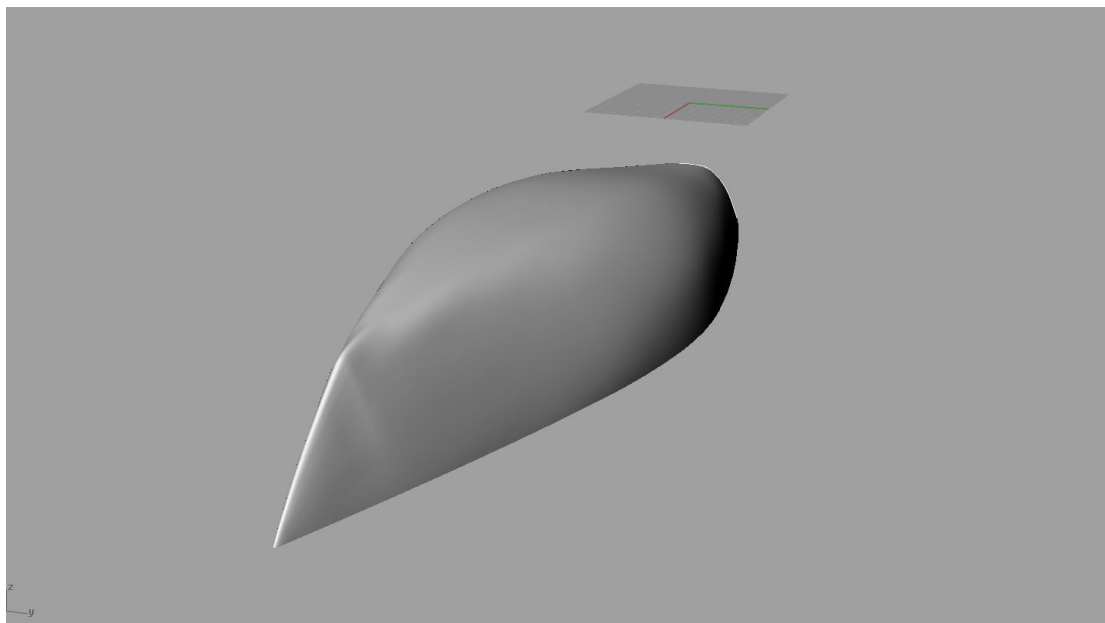
Όπως φαίνεται, η επιφάνεια του μοντέλου κλείνει απότομα όταν φτάνουμε σε κάποιο μήκος (περίπου στο 1.5 μέτρο). Αυτό σημαίνει ότι η γεωμετρία ενός νομέα πριν και μετά από αυτό το μήκος θα έχει μεγάλη διαφορά. Αυτό προκαλεί ανομοιομορφία στην επιφάνεια, και ακόμα και μετά από εισαγωγές ισάλων και εξομαλύνσεις αυτών και των νομέων, η επιφάνεια αυτή δεν ήταν τελείως ομαλή. Ένας παράγοντας στον οποίο οφείλεται αυτό είναι ότι η μέτρηση έχει ήδη αρκετά μεγάλο σφάλμα σε αυτή την περιοχή, και η χειροκίνητη εισαγωγή σημείων έχει πολύ μικρότερη ακρίβεια από τη γνωστή διαδικασία. Η επιφάνεια της βάρκας από την πρύμνη μέχρι αυτό το σημείο ανομοιομορφίας δεν παρουσίασε κανένα ουσιαστικό πρόβλημα.

Όσο για την επιφάνεια “καθρέφτη” που βρίσκεται στην πρύμνη, αυτή σχεδιάστηκε χωρίς κανένα πρόβλημα χρησιμοποιώντας την εντολή EdgeSrf (Edge Surface). Αυτή η εντολή πέρασε την επιφάνεια λαμβάνοντας υπ’ όψη τον πρώτο πρωραίο νομέα, ο οποίος χρειάστηκε μια επεξεργασία για να έχει μια κλίση προς τα μπροστά, και δύο ευθείες που ξεκινάνε από τα ακραία σημεία του. Η μία ευθεία ήταν παράλληλη στον άξονα y και σταμάτησε στο $z=0$ (κατάστρωμα). Η άλλη ευθεία ξεκίνησε από το ακραίο σημείο του νομέα το οποίο βρίσκεται στην περιφέρεια του μοντέλου, και σταμάτησε στο ίδιο σημείο, ώστε να σχηματιστεί μια κλειστή επιφάνεια.

Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή του τρισδιάστατου σχεδίου της βάρκας:

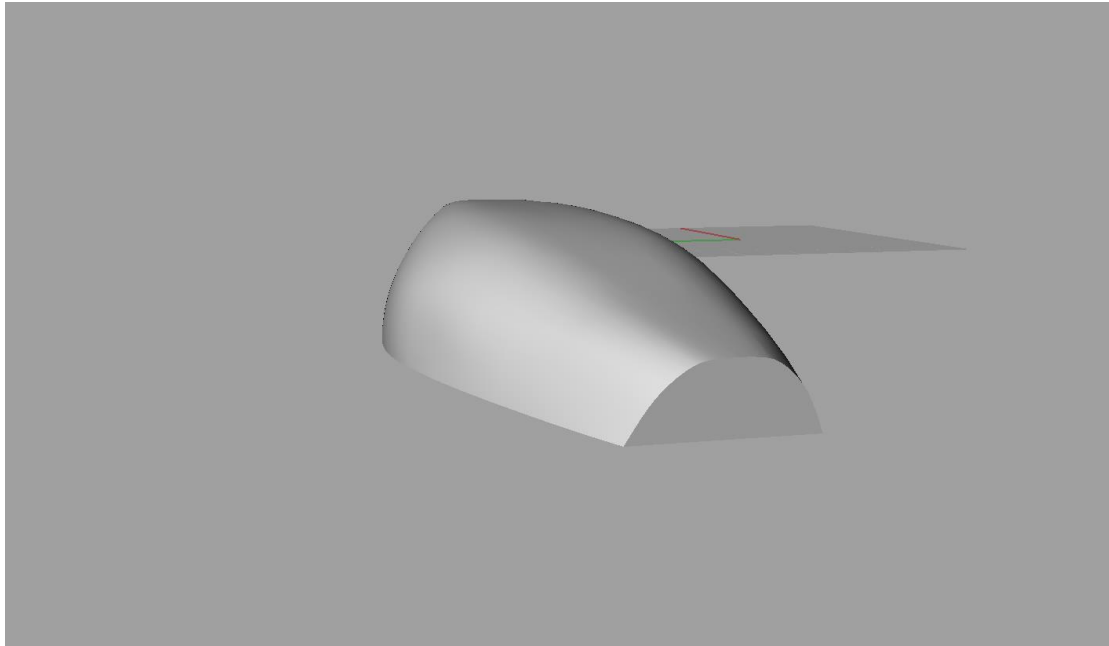


Εικόνα 5.8: Μοντέλο βάρκας από όλες τις όψεις

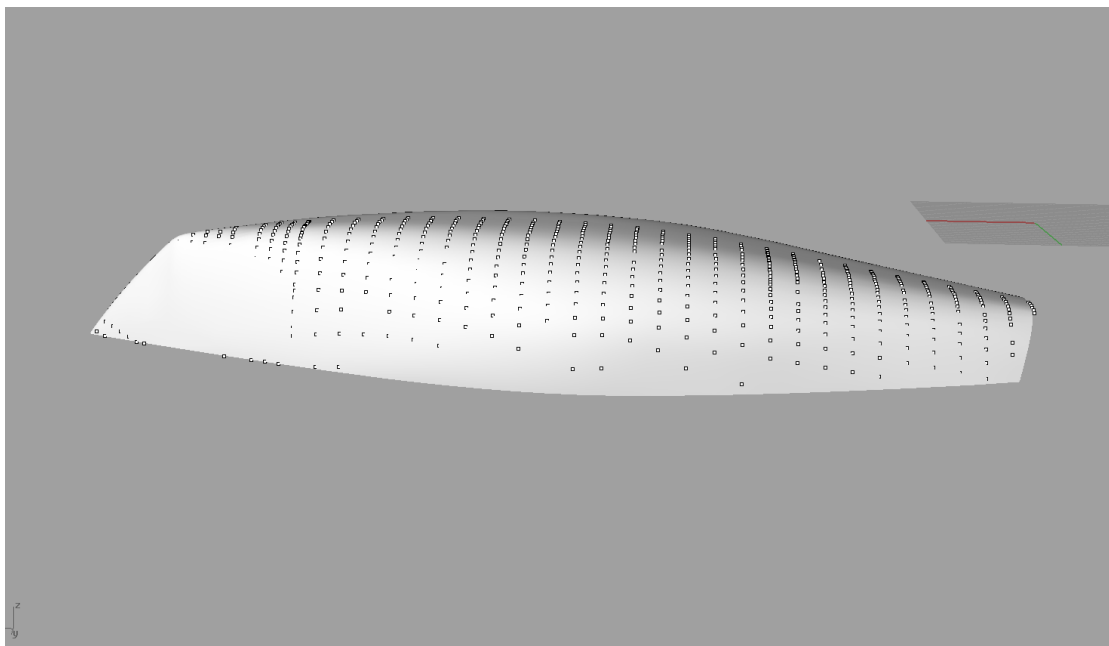


Εικόνα 5.9: Τρισδιάστατη όψη μοντέλου βάρκας από μπροστά

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται καθαρά η περιοχή στην οποία η σχεδίαση παρουσίασε δυσκολίες.



Εικόνα 5.10: Τρισδιάστατη όψη μοντέλου βάρκας από πίσω



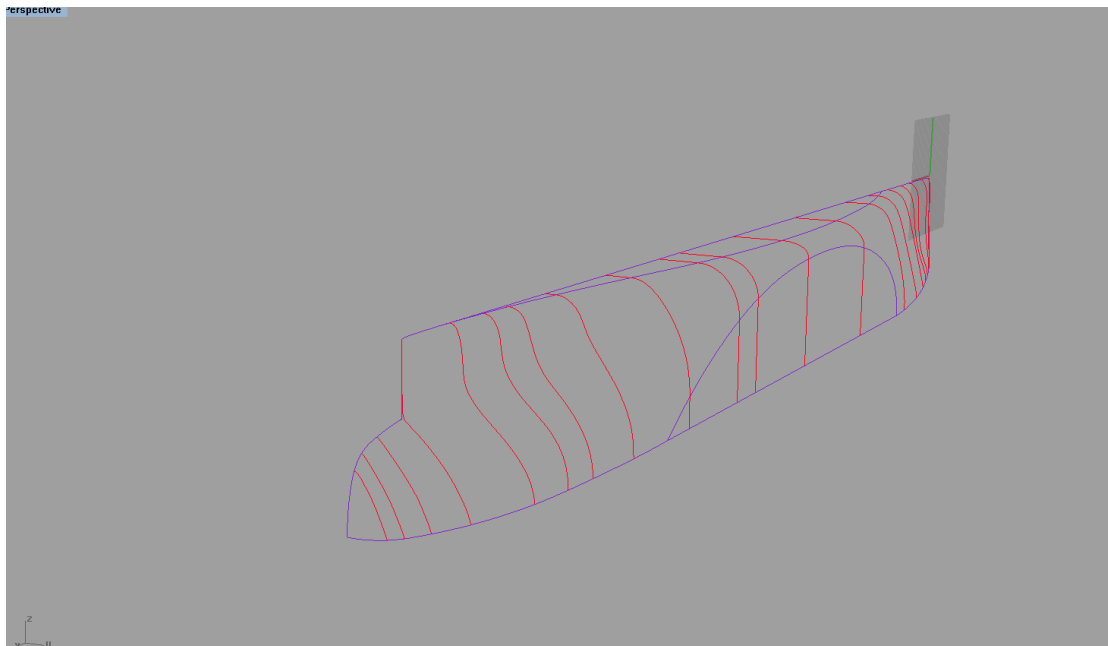
Εικόνα 5.11: Τρισδιάστατη όψη μοντέλου βάρκας με εμφάνιση σημείων

Σε αυτή την εικόνα φαίνεται ότι τα σημεία έχουν μεγάλη απόκλιση με την επιφάνεια κοντά στην πλώρη, ενώ στο υπόλοιπο μέρος η μέτρηση ήταν ικανοποιητική.

5.3: 3^ο μοντέλο: Λεπτόγραμμα σκάφος

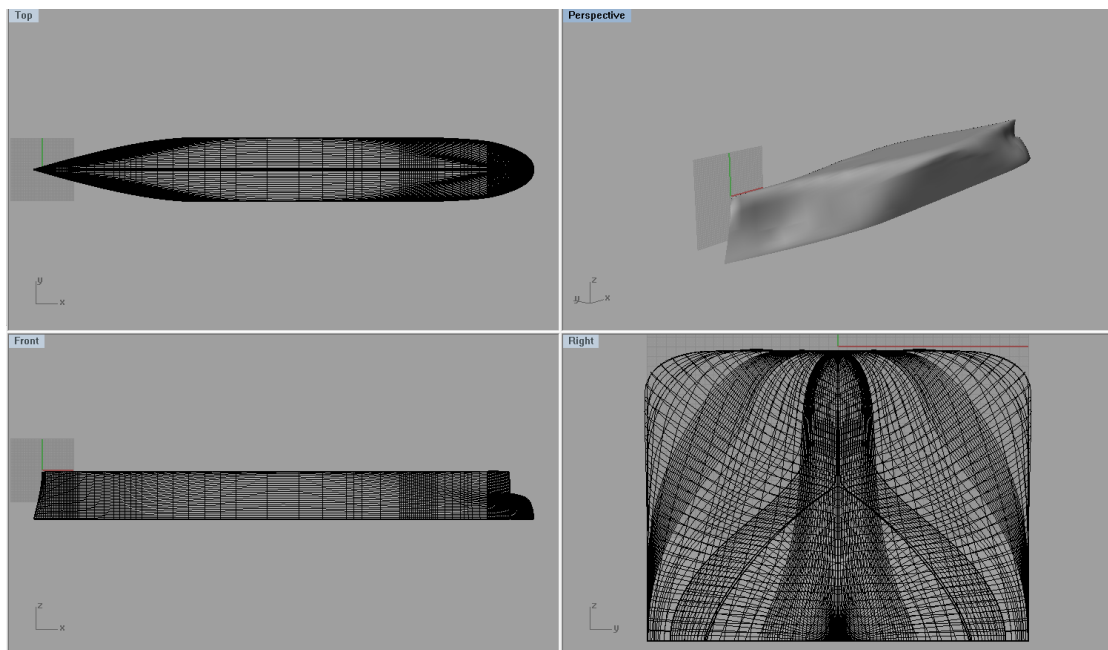
Το τελευταίο από τα 3 μοντέλα που μετρήθηκαν παρουσίασε κάποιες δυσκολίες εξαιτίας της γεωμετρίας του. Η καμπυλότητα του μοντέλου δεν επέτρεψε στον αισθητήρα να μετρήσει πολλά από τα σημεία που απαιτούνται για λεπτομερή σχεδίαση. Για αυτό το λόγο οι νομείς που σχεδιάστηκαν με βάση δε φτάνουν στο κατάστρωμα. Επιπλέον, η γεωμετρία της πλώρης δημιουργεί προβλήματα στη σχεδίαση των επιφανειών, και οι νομείς κοντά στην πρύμνη έχουν αντιστροφή καμπυλότητας, η οποία δε γινόταν να αποτυπωθεί μόνο από τα σημεία που μετρήθηκαν.

Πριν ξεκινήσει η σχεδίαση των οριακών γραμμών, δημιουργήθηκαν οι καμπύλες των FOB (Flat of Bottom) και FOS (Flat of Side), με βάση τα σημεία του μοντέλου με $y=0$ και $y=20$ (μέγιστο πλάτος) αντίστοιχα. Αυτές οι καμπύλες θα χρησιμοποιηθούν για τη σχεδίαση των οριακών γραμμών και των νομέων. Αρχικά, η κεντρική γραμμή σχεδιάστηκε με βάση τα σημεία του μοντέλου που έχουν ως συντεταγμένη y το 0. Στη συνέχεια, μετά τη δημιουργία νομέων και την τομή τους με την κεντρική γραμμή, έπρεπε να σχεδιαστεί η ίσαλος. Τα σημεία που μετρήθηκαν όμως, δεν έφταναν κοντά στο βάθος z της ισάλου. Μερικά σημεία κοντά στην πλώρη, τα οποία σημειώθηκαν κατά τη διαδικασία της μέτρησης, φτάσανε στο επιθυμητό βάθος της ισάλου. Επίσης, είναι γνωστό ότι η ίσαλος θα έχει τη μορφή ευθείας στην περιοχή του FOS. Με αυτά τα δεδομένα, καθώς και με τις φωτογραφίες, μπορεί να σχεδιαστεί η ίσαλος του σκάφους. Η ακρίβειά της όμως δεν είναι τέλεια, και δε μπορεί να μετρηθεί πολύ ικανοποιητικά με αυτό τον αισθητήρα. Οι νομείς, αφού έχουν πάρει μια αρχική μορφή, μπορούν να επεκταθούν με την εντολή "extend" ώστε να φτάσουν μέχρι την ίσαλο. Σημειώνεται επίσης ότι οι νομείς θα έχουν τη μορφή ευθείας από το FOB μέχρι την κεντρική γραμμή του πυθμένα, και από το FOS μέχρι την ίσαλο. Αυτό γίνεται με την εντολή "split", επιλέγοντας ως cutting objects τις καμπύλες FOB και FOS, και μετά με την εντολή "changedegree" αλλάζοντας έτσι το βαθμό της καμπύλης από 3° σε 1° (ευθεία). Η τελευταία εντολή γίνεται μόνο για τα τμήματα των νομέων που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές, και μετά ξαναενώνονται με την εντολή "join". Οι οριακές γραμμές, μαζί με τα FOB και FOS και τους νομείς, φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:

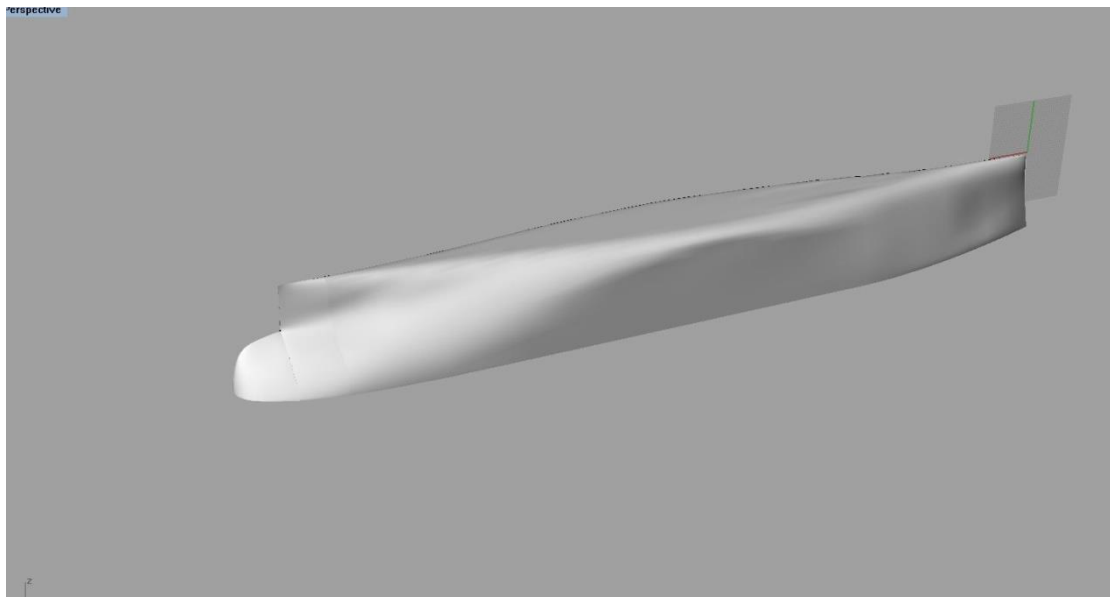


Εικόνα 5.12: Καμπύλες λεπτόγραμμου μοντέλου πριν τη δημιουργία επιφανειών

Με αυτές τις καμπύλες, μπορεί να δημιουργηθεί η επιφάνεια του μοντέλου, όπως φαίνεται παρακάτω:

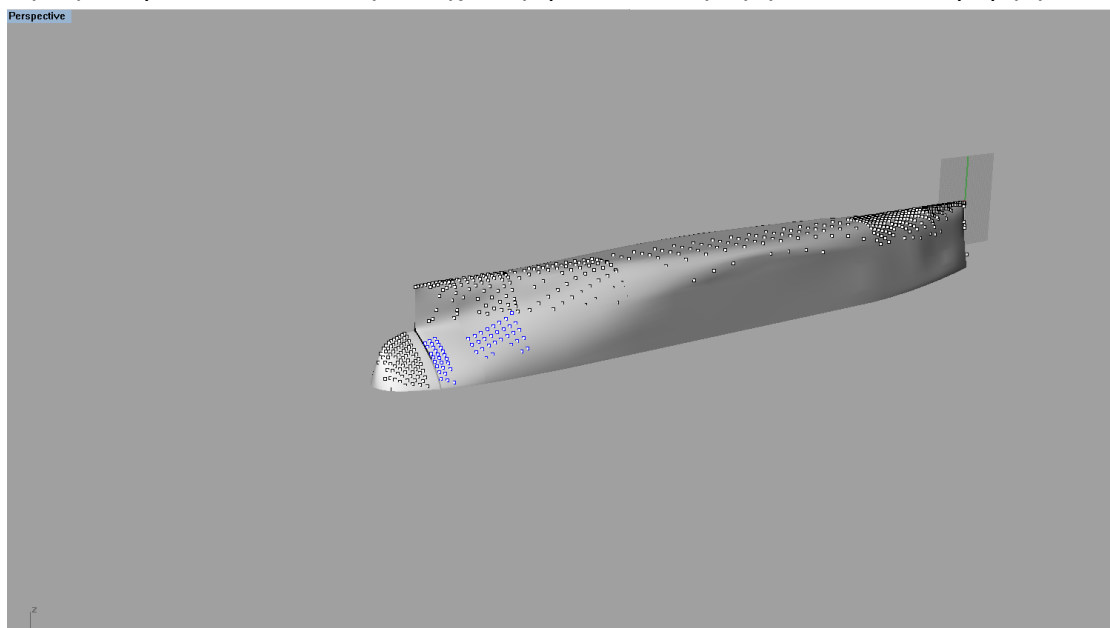


Εικόνα 5.13: Επιφάνεια ζου μοντέλου από όλες τις όψεις



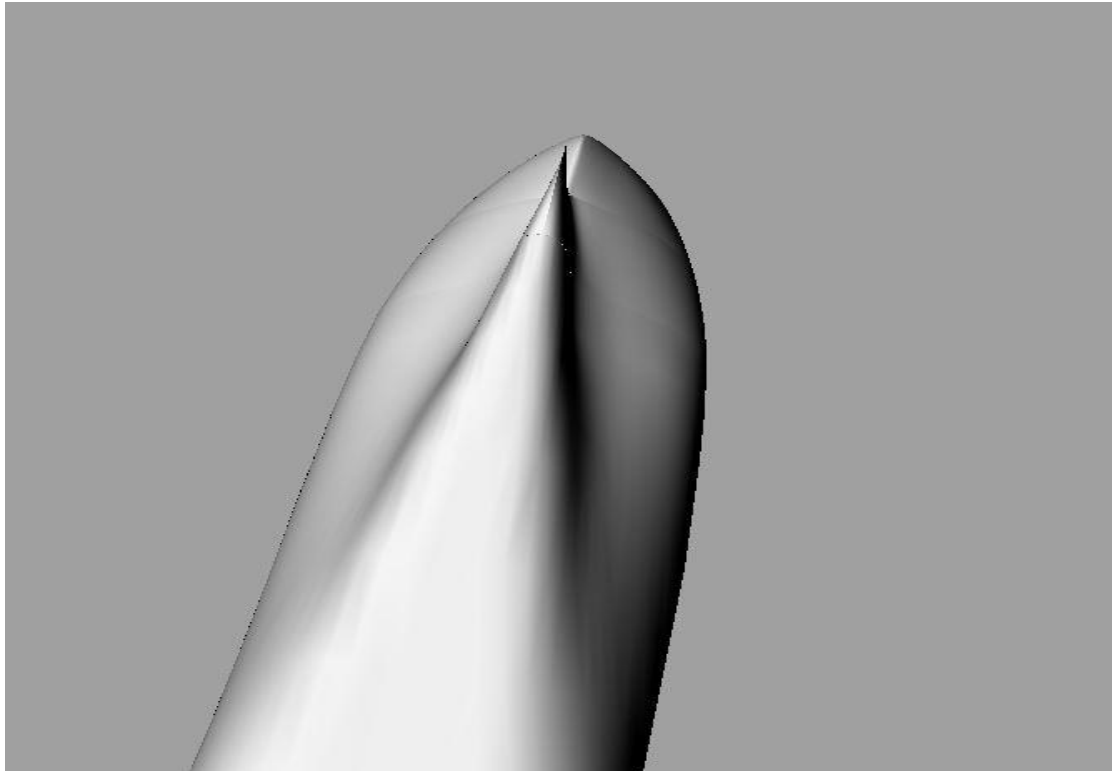
Εικόνα 5.14: Τρισδιάστατη όψη μοντέλου

Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, στις παραπάνω εικόνες φαίνονται όλες οι όψεις του μοντέλου, και στη συνέχεια η τρισδιάστατη όψη σε Rendered μορφή.



Εικόνα 5.15: Επιφάνεια λεπτόγραμμου μοντέλου με εμφάνιση σημείων

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, τα σημεία που μετρήθηκαν, με εξαίρεση αυτά της πλώρης, φτάνουν μέχρι ένα z που δεν πλησιάζει καθόλου την ισάλο. Αυτό μπορεί να προκάλεσε αποκλίσεις από την πραγματική γεωμετρία, αφού δεν υπήρχε αξιόπιστος τρόπος να γίνει γνωστή η γεωμετρία της ισάλου και των νομέων κοντά στην ισάλο.



Εικόνα 5.16: Επιφάνεια πρύμνης λεπτόγραμμου μοντέλου

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η ποιότητα επιφάνειας της πλώρης δεν είναι τόσο καλή όσο τα 2 προηγούμενα μοντέλα που σχεδιάστηκαν. Υπάρχουν 2 λόγοι που συμβάλλουν σε αυτό. Αρχικά, η ακμή που εμφανίζεται εκεί που τοποθετείται η έλικα εμποδίζει τον αισθητήρα από τη μέτρηση ενός τμήματος της επιφάνειας. Για αυτό το λόγο σχεδιάστηκαν ξεχωριστά δύο επιφάνειας με ένα κενό ανάμεσά τους, το οποίο συμπληρώθηκε με βάση τις ήδη γνωστές επιφάνειας και τις φωτογραφίες του μοντέλου.

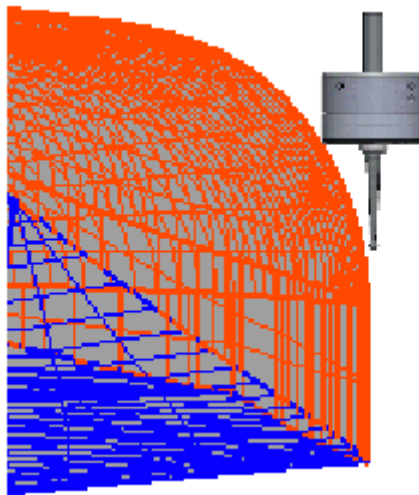
Ο δεύτερος λόγος είναι ότι η απότομη κλίση σε αυτή την περιοχή προκαλεί υπολογισμα σφάλματα στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

6: Περιγραφή και μελέτη σφαλμάτων μέτρησης

Σε αυτή την ενότητα θα συζητηθούν τα διαφορετικά σφάλματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων των σημείων. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν τρόποι διόρθωσης μερικών από αυτά, είτε αυτοί είναι σχεδιαστικοί, είτε διορθώσεις στην ίδια τη μέτρηση. Σημειώνεται ότι αυτά τα σφάλματα αφορούν τον ίδιο τον αισθητήρα και τη διαδικασία της μέτρησης. Υπάρχουν κάποια σφάλματα τα οποία παρουσιάζει η μηχανή CNC και δε σχετίζονται με τον αισθητήρα.

6.1: 1^ο είδος σφάλματος: Ανικανότητα προσέγγισης επιφάνειας

Μερικές φορές, ένας συγκεκριμένος αισθητήρας δε μπορεί να μετρήσει κάποια σημεία. Αυτό το σφάλμα παρουσιάστηκε στις μετρήσεις που έγιναν. Όταν η καμπυλότητα της επιφάνειας πλησιάζει τη γωνία των 90 μοιρών, το κέλυφος του αισθητήρα μπορεί να βρει επαφή με το μοντέλο πριν φτάσει στο επιθυμητό σημείο η βελόνα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μια πιθανή περίπτωση αυτού του σφάλματος, λαμβάνοντας ως επιφάνεια αναφοράς τη σανίδα της 1^{ης} μέτρησης:



Εικόνα 6.1: Επαφή επιφάνειας μοντέλου με κέλυφος του αισθητήρα

Όπως φαίνεται στην εικόνα, η βελόνα του αισθητήρα δεν έχει φτάσει στο σημείο που κανονικά πρέπει να μετρήσει, και σταματάει πιο πάνω. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει 2 είδη προβλημάτων.

Στην πρώτη περίπτωση, το μόνο πρόβλημα είναι ότι ο αισθητήρας θα σταματήσει, θα λάβει τη λανθασμένη μέτρηση, και θα συνεχίσει τη διαδικασία κανονικά. Αυτό

το πρόβλημα λύνεται εύκολα, σημειώνοντας τις συντεταγμένες (x,y) που μετρήθηκαν σε αυτό το βήμα, και στη συνέχεια διαγράφοντας αυτό το σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση, ο αισθητήρας μπορεί να μη σταματήσει, επειδή η βελόνα του δε βρήκε επαφή με κάποιο σημείο της επιφάνειας. Αν συμβεί αυτό τότε ο αισθητήρας θα συνεχίσει να μετακινείται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα τη μετακίνηση του μοντέλου μέσω της αυξημένης δύναμης που του ασκείται, ή και τη φθορά της επιφάνειάς του ή του αισθητήρα. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, είναι αναγκαία η συνεχής παρακολούθηση του αισθητήρα όταν αυτός βρίσκεται σε περιοχή με τέτοια καμπυλότητα, δηλαδή κοντά στο μέγιστο πλάτος. Όταν γίνει αντιληπτό ότι θα συμβεί αυτό, ο χειριστής θα πρέπει να εφαρμόσει μια δύναμη στον αισθητήρα με το χέρι, ώστε αυτός να σταματήσει πριν προκληθεί ζημιά. Το σημείο που μετρήθηκε είναι προφανώς λάθος, και θα διαγραφεί μετά το τέλος της μέτρησης ή κατά τη σχεδίαση των επιφανειών.

Ένας άλλος τρόπος να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση μεγαλύτερης βελόνας. Όταν η βελόνα έχει μεγαλύτερο μήκος, θα φτάνει σε πιο χαμηλά z χωρίς να υπάρχει μεγάλος κίνδυνος. Μερικές φορές όμως αυτό δεν είναι αρκετό, και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αισθητήρας Laser αν πρέπει να μετρηθεί η επιφάνεια.

6.2: 2^ο είδος σφάλματος: Διάμετρος της σφαίρας

Ένα ακόμα πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο ορίζεται το σημείο που καταγράφει ο αισθητήρας. Στην πραγματικότητα αυτό το σημείο δεν είναι το σημείο της επιφάνειας, αλλά ένα σημείο με μια συγκεκριμένη απόσταση από την υποδοχή του CNC. Στην περίπτωση του αισθητήρα, αυτό το σημείο ορίζεται ως το άκρο της σφαίρας της βελόνας, όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση. Πολλές φορές, και πάλι στις περιοχές κοντά στο μέγιστο πλάτος, το σημείο του αισθητήρα που έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο μέτρησης δε βρίσκεται ακριβώς κάτω από το κέντρο της σφαίρας, αλλά καπού αλλού στην περιφέρειά του. Το μέγιστο αριθμητικό σφάλμα που μπορεί να παρουσιαστεί με αυτό τον τρόπο είναι ίσο με την ακτίνα της σφαίρας. Για αυτό το λόγο δεν είναι αναγκαίο να υπολογιστεί, αφού συνήθως τα σημεία του κάθε νομέα θα μετακινηθούν κατά μεγαλύτερη απόσταση από τη χειρότερη περίπτωση αυτού του σφάλματος.

6.3: 3^ο είδος σφάλματος: Περιστροφή της βελόνας

Ένα ακόμα σφάλμα που παρουσιάστηκε κατά την εκτέλεση των μετρήσεων οφείλεται στην περιστροφή της βελόνας του αισθητήρα. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο είδος σφάλματος, το σημείο το οποίο καταγράφεται ορίζεται ως ένα σημείο με μια συγκεκριμένη κατακόρυφη απόσταση από την υποδοχή του εργαλείου στο CNC. Όταν ο αισθητήρας δε σχηματίζει μηδενική γωνία με τον άξονα z, τότε το άκρο του αισθητήρα έχει κάποια απόσταση από το σημείο που μετρείται στην πραγματικότητα. Αυτό το σφάλμα παρουσιάστηκε πιο έντονα στο 2^ο μοντέλο, όπου η γωνία μεταξύ της επιφάνειας της πλώρης και του επιπέδου xy ήταν πολύ μεγάλη. Ως αποτέλεσμα, ο αισθητήρας “γλιστράει” πάνω στην επιφάνεια πριν σταματήσει, και περιστρέφεται κατά κάποια γωνία.

Ένας τρόπος να μειωθεί αυτό το σφάλμα είναι η επιλογή χαμηλότερης ταχύτητας (Feedrate) στο Mach3. Ο τρόπος που ο αισθητήρας στέλνει σήμα στον υπολογιστή δεν είναι συνεχής, αλλά έχει τη μορφή παλμών. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα χρονικό διάστημα (μεταξύ δύο παλμών) μεταξύ της επαφής του αισθητήρα με το μοντέλο και της καταγραφής των συντεταγμένων. Όταν το μοντέλο έχει κάποια γωνία, αυτό σημαίνει ότι η βελόνα θα γλιστρήσει και θα πάρει κάποια γωνία πριν πάρει τις “σωστές” συντεταγμένες του σημείου. Αυτός ο χρόνος απόκρισης είναι σταθερός, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η επιλογή χαμηλότερης ταχύτητας θα οδηγήσει σε μικρότερη επιπλέον μετακίνηση του αισθητήρα προς τα κάτω, άρα και μικρότερο σφάλμα.

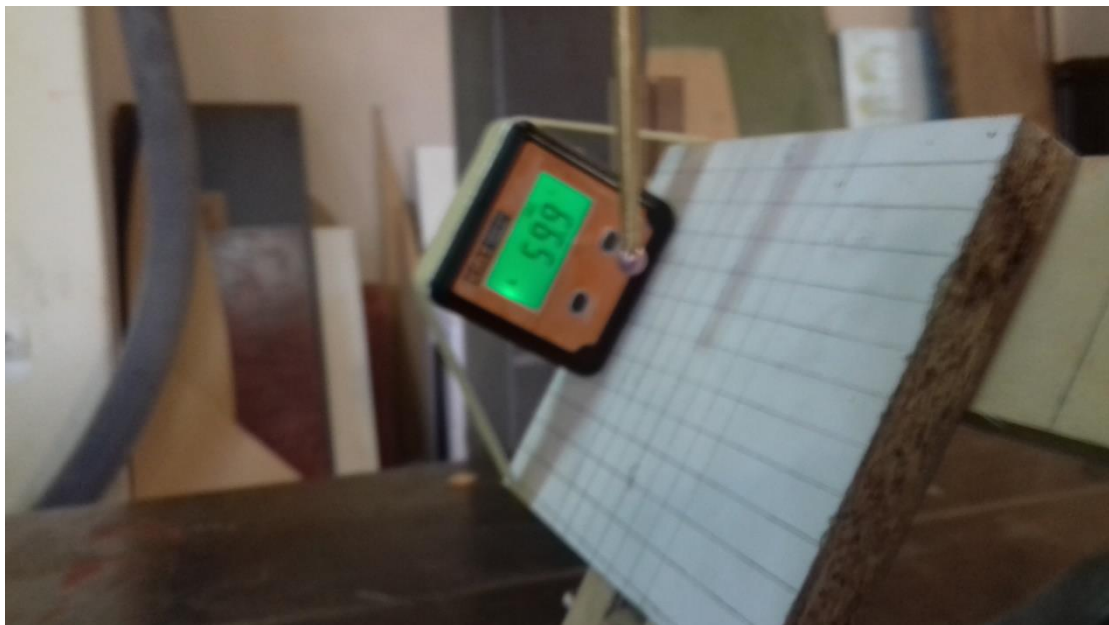
Για αυτό το λόγο έγινε μια ακόμα σειρά μετρήσεων, με μεταβλητή γωνία και ταχύτητα, για να μελετηθεί η εξάρτηση του σφάλματος από αυτούς τους παράγοντες.

6.3.1: Μελέτη σφάλματος αισθητήρα σε συνάρτηση με γωνία και ταχύτητα

Αυτές οι μετρήσεις έγιναν πάνω σε ένα ξύλινο επίπεδο, το οποίο μπορεί να περιστραφεί κατά κάποια γωνία από το άκρο του. Σε κάθε περίπτωση, πρώτα έγινε μια αργή, χειροκίνητη μετακίνηση του αισθητήρα προς τη διάταξη, και η καταγραφή του σημείου που εμφανίστηκε στην οθόνη. Στη συνέχεια, η διάταξη περιστράφηκε ώστε να πάρει κλίση 30 και 60 μοιρών ως προς τον άξονα x, και μετά ως προς τον y, ώστε να μελετηθεί η διαφορά των δύο σφαλμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η χειροκίνητη μετακίνηση έπρεπε να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα z, για να υπάρχει ένα γνωστό σημείο αναφοράς ως προς το οποίο θα μετρηθεί το σφάλμα.



Εικόνα 6.2: Διάταξη πειράματος, με περιστροφή κατά 30 μοίρες



Εικόνα 6.3: Διάταξη πειράματος, με περιστροφή κατά 60 μοίρες

Μετά από αυτές τις αργές μετακινήσεις και καταγραφές των συντεταγμένων, χρησιμοποιήθηκε κώδικας του Mach 3 για τη μέτρηση των ίδιων σημείων με 2 διαφορετικές ταχύτητες. Αν το σήμα που έδινε ο αισθητήρας ήταν συνεχές, θεωρητικά, οι συντεταγμένες αυτές θα ήταν οι ίδιες με αυτές που καταγράφηκαν προηγουμένως. Στην πραγματικότητα όμως, η συντεταγμένη z είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται ο κώδικας. Όπως ήταν αναμενόμενο, αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν το feedrate που επιλέχτηκε ήταν μεγαλύτερο. Οι

μετρήσεις παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω. Αρχικά, η διάταξη τοποθετήθηκε με γωνία 30 μοιρών ως προς τον άξονα των x . Η αργή χειροκίνητη μετακίνηση του αισθητήρα έδωσε σήμα επαφής όταν η ένδειξη της συντεταγμένης z ήταν -7.568. Όταν χρησιμοποιήθηκε ο wizard για τη μέτρηση των σημείων με feedrate 200 η ένδειξη του αισθητήρα ήταν -7.572 και -7.656. Ο λόγος που υπάρχουν 2 αποτελέσματα είναι ότι το Mach απαιτεί ένα πλέγμα σημείων για να τρέξει τον κώδικα. Αυτό σημαίνει ότι ο ελάχιστος αριθμός σημείων που μπορεί να δώσει είναι 4 (για 2 θέσεις x και 2 y). Οι δύο αυτές μετρήσεις έχουν μέσο όρο -7.614, και απέχει 0.046mm από τη μέτρηση που έγινε με χειροκίνητη μετακίνηση. Αυτή η απόκλιση είναι αρκετά μικρή και μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική για τη σχεδίαση επιφανειών στο Rhino, αλλά η ταχύτητα (feedrate) είναι πολύ μικρή και θα οδηγούσε σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο μετρήσεων. Στην πραγματικότητα οι μετρήσεις έγιναν με feedrate μεταξύ 500 και 1000 μονάδων, και για αυτό το λόγο επιλέχτηκε η ταχύτητα 750 για τη μελέτη του σφάλματος. Με αυτή την ταχύτητα, για την ίδια γωνία, το αποτέλεσμα της επαναληπτικής διαδικασίας έδωσε ένα z ίσο με -7.902, το οποίο απέχει 0.334 χιλιοστά από την αρχική μέτρηση. Το ίδιο ακριβώς έγινε και με τοποθέτηση της διάταξης παράλληλα στον άξονα y . Τα αποτελέσματα ήταν διαφορετικά από τα προηγούμενα, ακόμα και αν η γωνία ήταν πάλι 30 μοίρες και η αργή χειροκίνητη μετακίνηση έδωσε το ίδιο αποτέλεσμα. Για τη μικρή ταχύτητα (200), το z μετρήθηκε στα -7.624, ενώ για τη μεγάλη ταχύτητα (750) μετρήθηκε στα -8.058. Αυτό σημαίνει ότι η απόκλιση ήταν 0.056 και 0.49mm αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι το σφάλμα είναι σημαντικά μεγαλύτερο όταν η γωνία του αντικειμένου σχηματίζεται ως προς τον άξονα των y . Αξίζει να σημειωθεί ότι στα 3 μοντέλα που μετρήθηκαν, οι περισσότερες περιπτώσεις στις οποίες η καμπυλότητα επηρεάζει τα αποτελέσματα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Και τα 3 μοντέλα είχαν κάποια καμπυλότητα στις περιοχές του μεγίστου πλάτους τους, η οποία ήταν αρκετά μεγάλη για να επηρεάσει την ακρίβεια των σημείων.

Ο λόγος για τον οποίο τα αποτελέσματα της διαδικασίας ήταν διαφορετικά για γωνία ως προς τον άξονα y οφείλεται στον ίδιο τον αισθητήρα και στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε.



Εικόνα 6.4: Τμήμα του αισθητήρα (spider + Bearing Center))

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, και αναφέρθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο, ο τρόπος με τον οποίο ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται την επαφή είναι με τη μετακίνηση των 3 ράβδων μέχρι να έρθουν σε επαφή με τις μεταλλικές σφαίρες. Επειδή οι ράβδοι είναι 3, και τοποθετημένες ανά 120 μοίρες, σημαίνει ότι αν η μία ράβδος είναι παράλληλη προς τον άξονα x , οι άλλες 2 δε θα είναι παράλληλες με τον άξονα y , αλλά θα απέχουν 30 μοίρες από αυτόν. Για αυτό το λόγο η δύναμη που θα χρειαστεί για να επιτευχθεί η διέγερση του αισθητήρα θα είναι μικρότερη για τη ράβδο που είναι παράλληλη με τον άξονα x . Οι άλλες 2 ράβδοι θα δέχονται μια συνιστώσα της δύναμης που ασκείται στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται λίγο μεγαλύτερη δύναμη. Στη συγκεκριμένη σειρά μετρήσεων, η διάταξη είναι τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο ώστε η βελόνα του αισθητήρα να γλιστράει προς μια κατεύθυνση (x ή y), και λόγω της κατασκευής του αισθητήρα οι μετρήσεις για τη γωνία ως προς τον άξονα x πρέπει να έχουν μικρότερη απόκλιση. Πριν αλλάξει η γωνία της διάταξης, έγινε μια επιπλέον μέτρηση στην οποία η διάταξη τοποθετήθηκε σε γωνία περίπου 45 μοιρών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων πρέπει να βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά των αντίστοιχων που έγιναν για γωνία ως προς τους άξονες x και y .



Εικόνα 6.5: Τοποθέτηση διάταξης σε 45 μοίρες ως προς τους άξονες x,y

Όπως ήταν αναμενόμενο, το αποτέλεσμα του z για χαμηλή ταχύτητα ήταν -7.668 (ανάμεσα σε -7.614 και -7.824) και για υψηλή ταχύτητα ήταν -7.95 (ανάμεσα σε -7.902 και -8.058).

Στη συνέχεια, η διάταξη παίρνει γωνία 60 μοιρών και τοποθετείται πάλι παράλληλα στον άξονα x. Η χειροκίνητη μετακίνηση του αισθητήρα έδωσε ένδειξη επαφής για συντεταγμένη z ίση με 6.1. Όμοια με τη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για τις 30 μοίρες, ο αισθητήρας πραγματοποιεί επαναληπτικές διαδικασίες για 2 διαφορετικές ταχύτητες (200 και 750). Η μικρή ταχύτητα έδωσε σαν αποτέλεσμα -6.12 , ενώ η μεγάλη ταχύτητα έδωσε -6.394 . Η απόκλιση και πάλι είναι πολύ μικρή (0.02) για τη μικρή ταχύτητα, και πολύ μεγαλύτερη (0.294) για τη μεγαλύτερη.

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που έγινε για τις 30 μοίρες, η διάταξη τοποθετείται ξανά παράλληλα στον άξονα y. Για να επαληθευτούν αυτά που αναφέρθηκαν σχετικά με τη διάταξη του αισθητήρα, από τη στιγμή που η τοποθέτησή του στη μηχανή CNC δεν άλλαξε, τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να έχουν μεγαλύτερη απόκλιση από αυτά για τη γωνία ως προς τον άξονα x. Για τη χαμηλή ταχύτητα το z που μετρήθηκε είναι -6.132 , το οποίο είναι μεγαλύτερο από το -6.12 (κατά απόλυτη τιμή). Όσο για την υψηλή ταχύτητα, ο αισθητήρας έφτασε σε ύψος -6.732 , πολύ μεγαλύτερο κατά απόλυτη τιμή από το -6.342 της προηγούμενης μέτρησης.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να επαληθευτεί το γεγονός ότι οι γωνίες ως προς τον άξονα y προκαλούν μεγαλύτερο σφάλμα στο μετρούμενο μέγεθος, ειδικά για μεγάλες ταχύτητες.

Στη μέτρηση των μοντέλων οι ταχύτητες που επιλέχθηκαν ήταν μεγάλες, και για αυτό το λόγο τα αποτελέσματα για την ταχύτητα των 750 είναι πιο ενδεικτικά της πραγματικότητας. Στην τελευταία περίπτωση, δηλαδή στις 60 μοίρες και υψηλή ταχύτητα, ο αισθητήρας είχε απόκλιση κατά μέσο όρο 0.632mm από το πραγματικό μέγεθος. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρκετά την ποιότητα της επιφάνειας, αφού κάποια σημεία θα έχουν σχεδόν μηδενική απόκλιση (κοντά στο κέντρο, σχεδόν επίπεδη επιφάνεια) και άλλα θα έχουν πολύ μεγαλύτερη. Επιπλέον, στο 2^ο και στο 3^ο μοντέλο υπήρχαν τμήματα με καμπυλότητα πολύ μεγαλύτερη των 60 μοιρών, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η απόκλιση αυτών των σημείων ήταν ακόμα μεγαλύτερη. Το ίδιο το σφάλμα μπορεί να μη φαίνεται σημαντικό, αλλά η μεταβολή της καμπυλότητας από επίπεδη (σχεδόν μηδενικό σφάλμα) σε κάποια μεγάλη γωνία μπορεί να προκαλέσει μια ανομοιομορφία στα αποτελέσματα, με καλή ακρίβεια στο επίπεδο τμήμα και χειρότερη στο καμπύλο τμήμα. Αυτό, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα σφάλματα, μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στη σχεδίαση των επιφανειών.

6.4: Σφάλματα μηχανής

Εκτός από τα σφάλματα που σχετίζονται με την κατασκευή του αισθητήρα και τη λειτουργία της μέτρησης, αξίζει να αναφερθούν και τα σφάλματα που οφείλονται στη μηχανή CNC. Αρχικά, υπάρχει πιθανότητα να υπάρχει μια διαφορά ανάμεσα στην ένδειξη της οθόνης με την πραγματική θέση του άκρου του αισθητήρα. Αυτό το σφάλμα όμως δεν προκαλεί κανένα πρόβλημα, επειδή όλα τα σημεία που καταγράφονται θα έχουν το ίδιο ακριβώς αριθμητικό σφάλμα, άρα η πραγματική επιφάνεια θα είναι η ίδια. Επιπλέον, η αρχή των αξόνων ορίζεται από το χειριστή, άρα αυτό το σφάλμα δεν επηρεάζει καθόλου την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Ένα ακόμα σφάλμα, το οποίο επίσης δεν έχει καμία επιρροή στη διαδικασία είναι η ακρίβεια της μηχανής. Πολλές φορές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, αν και το βήμα ήταν ακέραιος αριθμός, η συντεταγμένη x είχε αποτέλεσμα της μορφής 149.9999 ή 150.0001. Αυτό το σφάλμα είναι της τάξης 4^{ου} δεκαδικού ψηφίου, και για αυτό το λόγο θεωρείται αμελητέο και αγνοείται. Το τελευταίο σφάλμα της μηχανής, το οποίο μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας είναι η μη καταγραφή κάποιων σημείων. Αρκετές φορές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο αισθητήρας προσπέρασε μια μέτρηση και συνέχισε στην επόμενη χωρίς να πάρει τις συντεταγμένες του σημείου. Αν το πλέγμα των σημείων είναι αρκετά πυκνό, ή αν η επιφάνεια δεν έχει αλλαγές στην καμπυλότητα, τότε δεν έχει μεγάλη σημασία. Υπάρχει όμως μια πιθανότητα να γίνει κατά τη διάρκεια της μέτρησης σημείων σε ένα τμήμα του μοντέλου που έχει έντονη καμπυλότητα. Σε

αυτή την περίπτωση η απώλεια ενός σημείου μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στη σχεδίαση. Αυτό το σφάλμα δεν έχει μεγάλη συχνότητα, αλλά δεν υπάρχει και τρόπος να προβλέψει κάποιος πότε θα συμβεί. Εκτός από αυτό, μερικές φορές ο αισθητήρας θα κατέβει μέχρι την επιφάνεια του μοντέλου, θα εμφανίσει ένδειξη επαφής, αλλά το σημείο δε θα καταγραφεί στο αρχείο txt. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σφάλμα να μη γίνει αντιληπτό μέχρι τουλάχιστον τη διαδικασία της σχεδίασης. Με αυτό τον τρόπο η απώλεια ενός σημείου θα δημιουργήσει προβλήματα στην ποιότητα της επιφάνειας τα οποία δε μπορούν να λυθούν με βάση τα σημεία.

7: Συμπεράσματα

Το βασικό πρόβλημα που έπρεπε να επιλυθεί σε αυτή την εργασία ήταν η κατασκευή ενός μηχανικού αισθητήρα επαφής με ιδιότητες παρόμοιες με αυτούς του εμπορίου, αλλά πολύ χαμηλότερο κόστος υλικών. Αποδείχτηκε ότι όσον αφορά το μηχανουργικό κομμάτι, δεν υπήρχε ιδιαίτερη δυσκολία στην κατασκευή αυτού του εργαλείου. Για τη μελέτη της ακρίβειάς του έγιναν μετρήσεις πάνω σε 3 μοντέλα που διαθέτει το κτίριο υδροδυναμικής: μια ιστιοσανίδα, ένα παχύγραμμο και ένα λεπτόγραμμο μοντέλο σκάφους. Το πρώτο από αυτά τα μοντέλα είχε αρκετά απλή γεωμετρία, και μετά από λίγη επεξεργασία σε σχεδιαστικό πρόγραμμα η ποιότητα της επιφάνειας ήταν πολύ καλή. Τα άλλα 2 μοντέλα παρουσίαζαν κάποιες ιδιομορφίες στη γεωμετρία που για διαφορετικούς λόγους προκάλεσαν δυσκολίες στη σχεδίαση. Ένα βασικό πρόβλημα είναι ότι η βελόνα του αισθητήρα δε μπορούσε να φτάσει μεγάλα τμήματα των επιφανειών τους, το οποίο σημαίνει ότι δεν υπήρχαν στοιχεία για τη σχεδιάσή τους εκτός από τις φωτογραφίες και την καμπυλότητα των νομέων. Σε αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη βελόνα για να μειωθεί το πλήθος των χαμένων σημείων, αλλά λόγω της καμπυλότητας των μοντέλων και των περιορισμών της μηχανής, ένας αισθητήρας επαφής δε μπορεί να καταγράψει κάποια τμήματα της επιφάνειας. Τα τμήματα της επιφάνειας που αποτυπώθηκαν από τη μέτρηση του αισθητήρα έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, φαίνεται ότι είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας αισθητήρας με απλά υλικά και να έχει ικανοποιητική ακρίβεια σε πολλές περιπτώσεις. Αν η επιφάνεια δεν έχει μεγάλες γωνίες και αλλαγές καμπυλότητας, τότε ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε είχε ακριβή αποτελέσματα, και μετά από κάποια επεξεργασία, η επιφάνεια είχε πολύ καλή ποιότητα. Σε μια πιο δύσκολη γεωμετρία όμως, παρουσιάζονται σφάλματα που οφείλονται στον ίδιο τον αισθητήρα, στη διαδικασία της μέτρησης, στην επιλογή των παραμέτρων ή στη σχεδίαση των επιφανειών. Κάποια από αυτά τα προβλήματα λύνονται με τρόπους όπως η μείωση της ταχύτητας, η επιλογή πυκνότερου πλέγματος σημείων, ή η επιλογή διαφορετικού μήκους βελόνας. Κάποια σφάλματα όμως παρουσιάζονται λόγω της ποιότητας του αισθητήρα. Το εργαστήριο έχει ήδη παραγγείλει έναν αισθητήρα επαφής του εμπορίου, ο οποίος θα έχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, και θα χάνει λιγότερα σημεία. Αξίζει να μελετηθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων της μέτρησης σημείων με αυτό τον αισθητήρα, και η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα του αισθητήρα που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της εργασίας. Μία ακόμα πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι η μελέτη των μετρήσεων ενός αισθητήρα Laser. Ένα από τα προβλήματα του αισθητήρα επαφής ήταν ο μεγάλος χρόνος εκτέλεσης μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Ο αισθητήρας Laser δε χρειάζεται να κάνει κίνηση ως προς τον άξονα z, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση σε

μεγάλο βαθμό του πειράματος. Μπορεί να γίνει μια μελέτη της κατασκευής ενός τέτοιου αυτοσχέδιου αισθητήρα με παρόμοιο τρόπο όπως έγινε και για το μηχανικό. Στη συνέχεια μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του με έναν αισθητήρα επαφής, είτε με αυτόν που κατασκευάστηκε είτε με έναν του εμπορίου. Ένα ακόμα πρόβλημα που λύνεται με αυτό το είδος αισθητήρα είναι ότι αν υπάρχει παραπάνω από μία δέσμη σε διαφορετικές γωνίες, τότε μπορούν να αποτυπωθούν αντικείμενα με αρνητική γεωμετρία. Αυτό θα είναι πολύ χρήσιμο για τη μελέτη των μοντέλων πλοίων, καθώς πολλά από αυτά έχουν βολβό στην πλώρη, κάτι που δε μπορεί να μετρηθεί αλλιώς.

Βιβλιογραφία

Adam Wozniak, Michal Jankowski. (2017, July). Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools.

C.-K Song, S. -W. Kim (1997). *Reverse engineering: Autonomous digitization of free-formed surfaces on a CNC coordinate measuring machine*. July.

Kley, M. V. (2011). *Working with Rhinoceros 4.0*.

Lynch M. (1997). *Parametric Programming for Computer Numerical Control Machine Tools and Touch Probes: CNC's Best Kept Secret*.

Martin Kennedy, HSMC. (2012, February). Building a Digitizing Probe.

Newfangled Solutions, ArtSoft . Using Mach3Mill.

Smid, P. *CNC Programming Handbook*.

Vosniakos, G., & Giannakakis, T. (2003). *Reverse-engineering of simple surfaces of unknown shape with touch probes: scanning and compensation issues*.

Κώστας, Κ. Β. (2014). *3D σχεδίαση και υπολογισμοί με το Rhino 3D*.