



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

**ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΩΝ ΔΙΣΚΩΝ**

**Σπουδαστές: Ισαακίδης Γεώργιος
Σπυρόπουλος Αντώνιος**

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: κ. Μαρία Δρακάκη

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Εισαγωγή στην Προσθετική Κατασκευή.....	4
Διάφορες μέθοδοι.....	4
Στερεολιθογραφία (Stereolithography).....	4
Επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ (Selective Laser Sintering).....	5
Κατασκευή ελασματοποιημένων αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing).....	6
Κατασκευή με Εναπόθεση Υλικού (Fused deposition modeling).....	7
Τρισδιάστατη εκτύπωση (3-Dimensional Printing).....	8
Ιστορική αναδρομή.....	8
CNC μηχανές.....	9
Βηματικοί κινητήρες.....	10
Κινητήρας μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης.....	10
Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	12
Υβριδικός βηματικός κινητήρας.....	12
Βηματικοί κινητήρες δύο φάσεων.....	13
Μονοπολικά βηματικά μοτέρ.....	13
Διπολικά βηματικά μοτέρ.....	13
Οδηγοί μοτέρ.....	14
Arduino.....	15
CAD Προγράμματα.....	16
Κατασκευή.....	17
Προγραμματισμός.....	23
Συμπεράσματα.....	24
Αναφορές.....	25
Παράρτημα Α - Ηλεκτρολογικά Σχέδια.....	26

Περίληψη

Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιεί βηματικούς κινητήρες από μονάδες οπτικών δίσκων κατασκευάστηκε για την πτυχιακή μας εργασία. Ένας Arduino μικροϋπολογιστής ανέλαβε να ελέγξει τους βηματικούς κινητήρες μέσω των οδηγών συνεχούς ρεύματος και ένα τρισδιάστατο στυλό χρησιμοποιήθηκε ως η εκτυπωτική μονάδα. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε μέσω της σουίτας Arduino και ο σχεδιασμός των τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω ανοιχτού κώδικα προγραμμάτων. Για τους άξονες, οι τρεις μονάδες δίσκων επανασυναρμολογήθηκαν για να σχηματίσουν τα X, Y και Z επίπεδα. Ακόμα, η κατασκευή μπορεί να χειρισθεί ως CNC μηχανή αντικαθιστώντας το 3D στυλό με άλλα εξαρτήματα, όπως ένα ηλεκτρικό δράπανο. Ο 3D εκτυπωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς, σαν εκπαιδευτικό εργαλείο σε εργαστηριακές εργασίες. Παρέχει τους μαθητές την ευκαιρία να μάθουν περισσότερα για τις ρομποτικές μηχανές και να δημιουργήσουν μια από το μηδέν.

Abstract

A three dimensional printer using step motors from 3.5-inch disk drives was built for our undergraduate research thesis project. An Arduino microcontroller was in charge of controlling the steppers through the DC drivers and a 3D pen was used as the printing unit. The program was created with the Arduino suite and the design of the drawing with open source CAD programs. For the axes, three disk drives were reassembled to form the X, Y and Z levels. Moreover, this structure can be operated as a Computerized Numerical Control machine by replacing the 3D pen with other components, such as a drill. The 3D printer will be used for educational purposes, as a teaching tool in laboratory projects. It provides an opportunity for students to learn more about robotic machines and create one from scratch.

Εισαγωγή στην Προσθετική Κατασκευή

Η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing, AM) είναι η διαδικασία κατασκευής κατά την οποία το τρισδιάστατο προϊόν υλοποιείται από λεπτές στρώσεις υλικού ή μία πάνω στην άλλη. Αυτό το υλικό μπορεί να είναι οποιοδήποτε δομικό στοιχείο, όπως πλαστικό, μέταλλο, σκυρόδεμα, ίσως και ανθρώπινος ιστός κάποια μέρα. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαδικασίες Προσθετικής Κατασκευής, όλες όμως διαθέτουν κοινούς συντελεστές. Για την παραγωγή απαιτούν την χρήση ενός υπολογιστή, ένα λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης (Computer Aided Design, CAD), τον εξοπλισμό της μηχανής και τέλος το υλικό που θα επιστρωθεί. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της σχεδίασης του ψηφιακού μοντέλου από το πρόγραμμα, η μηχανή αναλύει τα δεδομένα και ξεκινάει την επίστρωση του υλικού, είτε αυτό είναι υγρό, σκόνη, φύλλο ή οτιδήποτε άλλο για να σχηματίσει το τρισδιάστατο αντικείμενο. Ο όρος Προσθετική Κατασκευή περιλαμβάνει αρκετές τεχνολογίες και υποσύνολα, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), η ταχεία προτυποποίηση (Rapid Prototyping), η Άμεση Ψηφιακή Κατασκευή (Direct Digital Manufacturing), η στρωματική κατασκευή (Layered Manufacturing) και η Πρόσθετη Παραγωγή (Additive Fabrication). Οι εφαρμογές της Προσθετικής Κατασκευής είναι θεωρητικά απεριόριστες. Μια από τις πρώτες χρήσεις της ήταν η ταχεία προτυποποίηση, η χρήση εκτυπωτών για την οπτικοποίηση προπαραγωγικών μοντέλων. Σήμερα, έχει λάβει πιο ευρεία χρήση, αφού κατασκευάζει προϊόντα για τελική χρήση για τους κλάδους της αεροναυτικής, της οδοντιατρικής, της ιατρικής με την μορφή εμφυτευμάτων, της αυτοκινητοβιομηχανίας ακόμα και για της ανάγκες της μόδας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει απλή προσέγγιση, όμως τα οφέλη της μπορούν να καλύψουν πολύπλοκες και διαφορετικές ανάγκες. Αναλυτικότερα, αποτελεί ένα εργαλείο οπτικοποίησης στον σχεδιασμό, ένα μέσο για την δημιουργία εξατομικευμένων προϊόντων για καταναλωτές και επαγγελματίες, για την κατασκευή βιομηχανικών εργαλείων, για την κατασκευή μικρών και πολλών εξαρτημάτων παραγωγής και, ίσως στο κοντινό μέλλον, την αναπαραγωγή ανθρώπινων μερών.

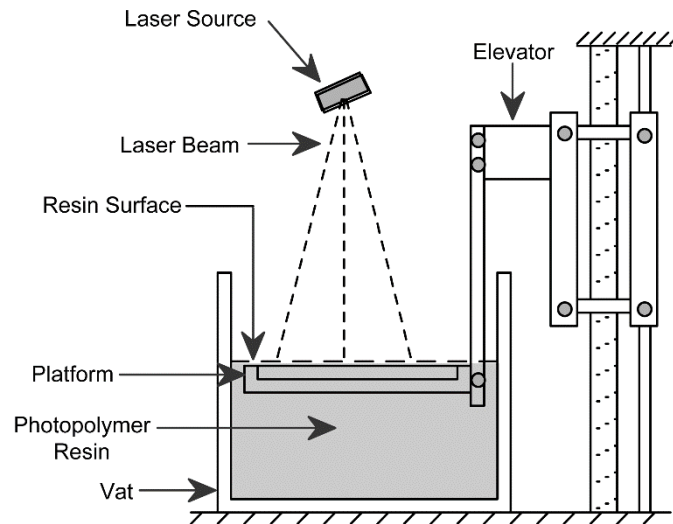
Διάφορες μέθοδοι

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής τα τελευταία 25 χρόνια. Μερικές από τις κύριες και πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές αποτελούν:

Στερεολιθογραφία (Stereolithography).

Η τεχνική αυτή είναι γνωστή και ως οπτική αναπαραγωγή (optical fabrication), φωτο-στερεοποίηση (photo-solidification), στερεά

αναπαραγωγή ελεύθερης μορφής (solid free form fabrication) και στερεά απεικόνιση. Υψηλή τεχνολογία που χρησιμοποιεί ένα laser για να σκληρύνει στρώσεις φωτοπολυμερούς ρητίνης, η οποία αλλάζει ιδιότητες όταν έρθει σε επαφή με το φως. Η διαδικασία λαμβάνει τόπο σε ένα δοχείο ρητίνης, όπου μια δέσμη φωτός ιχνηλατεί το περίγραμμά της κάθε στρώσης του μοντέλου. Κατά την διάρκεια του κύκλου της κατασκευής η πλατφόρμα που τοποθετείται η κατασκευή επανατοποθετείται σε χαμηλότερο σημείο από το προηγούμενο, ίσο με το πάχος της στρώσης, συνήθως 0.1mm.

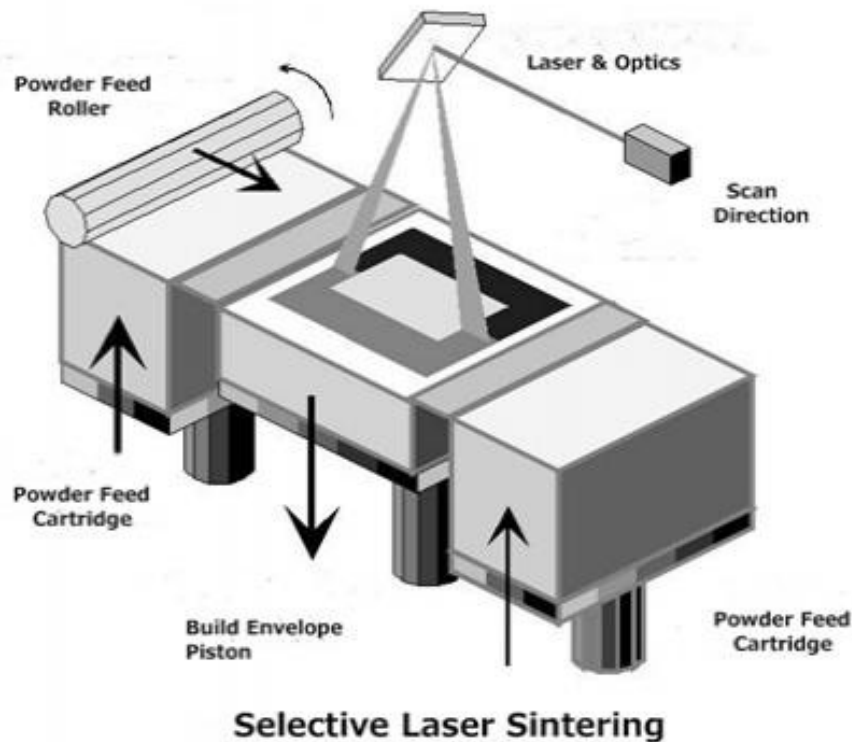


Μια δεύτερη ακτίνα laser λειτουργεί ως επιβεβαίωση ότι η στρώση βρίσκεται στο σωστό σημείο. Συχνά προθέτεται ειδικό υλικό για να παρέχει καλύτερη στήριξη στο μοντέλο. Θεωρείται αρκετά γρήγορη διαδικασία και οι μηχανές έχουν υψηλό κόστος αγοράς, ενώ το παραγόμενο μοντέλο συνήθως έχει διαστάσεις μέχρι 50x50x60 cm. Η παραπάνω διαδικασία είναι δημοφιλής για την υλοποίηση μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για χύτευση με έγχυση, θερμοδιαμόρφωση ή άλλες διεργασίες χύτευσης.

Επιλεκτική σύντηξη με λέιζερ (Selective Laser Sintering)

Είναι παρόμοια με την διαδικασία της στερεολιθογραφίας, ένα υψηλής ισχύος λέιζερ λιώνει μικρά σωματίδια πλαστικού, μετάλλου, κεραμικού ή γυαλιού που τροφοδοτούνται στην περιοχή σύντηξης με την βοήθεια ενός κυλίνδρου. Κοινή τακτική είναι θέρμανση του υλικού σε μια θερμοκρασία χαμηλότερης της τήξεως του υλικού ώστε να βοηθήσει το laser να συγκολλήσει την σκόνη. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, τα ευαίσθητα μέρη δεν απαιτούν την στήριξη από επιπλέον υλικό και η διαδικασία περιλαμβάνει δύο μεταβατικές μεθόδους. Το υλικό από στερεό γίνεται υγρό και μετά πάλι στερεό. Μια παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η άμεση σύντηξη μετάλλου με laser (Direct metal laser sintering). Αυτή η

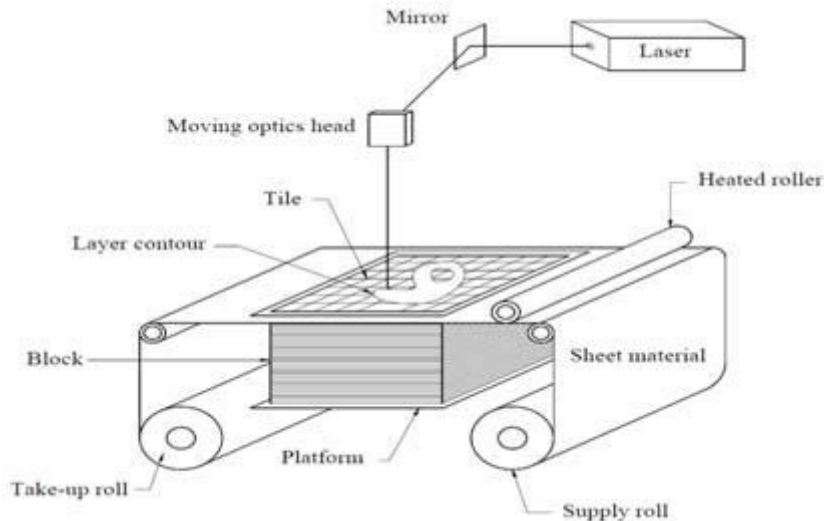
τεχνική διαφέρει λόγω του υλικού που χρησιμοποιείται, ανοξειδωτος χάλυβας, κοβάλτιο, τιτάνιο και θεωρητικά κάθε κράμα μετάλλου.



Το τελικό προϊόν μπορεί να έχει διαστάσεις μέχρι 250x250x185 και τα παραχθέντα μοντέλα είναι συνώνυμα της καλής ποιότητας, υψηλής ακρίβειας και λεπτομέρειας και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Η σκόνη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μπορεί να είναι είτε ενός υλικό είτε μείγμα πολλών. Αυτή η μέθοδος, λόγω των αποτελεσματικών πρωτοτύπων που παράγει, εμπλέκεται όλο και συχνότερα στην κατασκευή περιορισμένων τεμαχίων έτοιμα για χρήση.

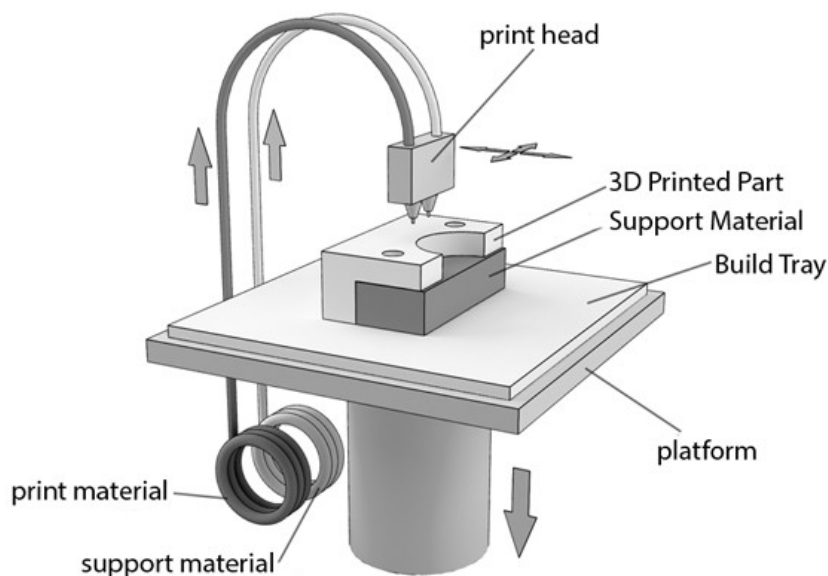
Κατασκευή ελασματοποιημένων αντικειμένων (Laminated Object Manufacturing)

Αυτή η μέθοδος υλοποιείται με ένα σύστημα που κολλάει και κόβει φύλλα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου. Η μία από τις δύο επιφάνειες του φύλλου πρώτης ύλης είναι επικαλυμμένη με μια κολλητική ουσία που όταν πιεσθεί και θερμανθεί ενώνεται με την προηγούμενη. Τέλος, το τελικό σχήμα δίνεται από ένα laser που δίνει το τελικό σχήμα, κόβοντας ανάλογα το μοντέλο. Σε γενικές γραμμές χαρακτηρίζεται ως οικονομική μέθοδος, όμως το προϊόν έχει χαμηλή ποιότητα επιφάνειας και απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία.



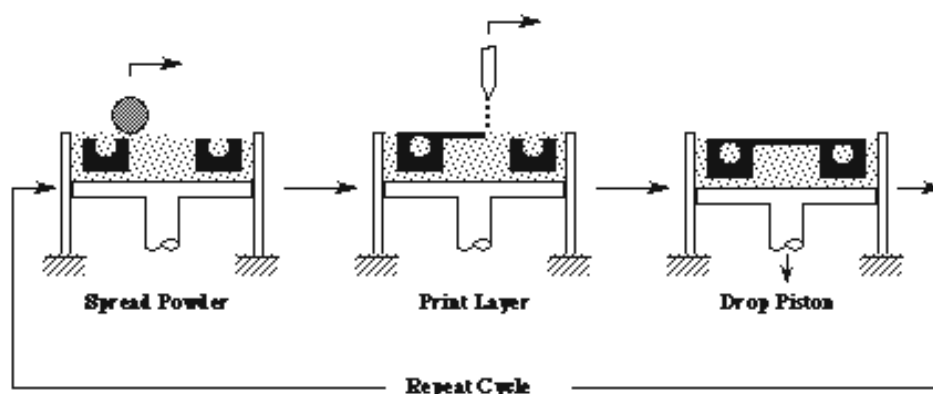
Κατασκευή με Εναπόθεση Υλικού (Fused deposition modeling)

Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την χρήση θερμοπλαστικών, δηλαδή πολυμερών που αλλάζουν σε υγρή μορφή με την εφαρμογή θερμότητας και στερεοποιούνται όταν ψυχθούν. Το υλικό διοχετεύεται από ακροφύσια στην επιφάνεια κατασκευής και το μηχάνημα περιμένει να σκληρύνει η προηγούμενη στρώση πριν μεταβεί στην επόμενη. Η πρώτη ύλη είναι σε μορφή σύρματος σε καρούλι και τροφοδοτείται στην μηχανή όπου και θερμαίνεται. Μια μηχανή μπορεί να εναποθέσει πολλαπλά υλικά, τόσο σε σύνθεση όσο και σε χρώμα, ώστε να δημιουργηθούν πολύπλοκα σχήματα. Όπως και με την στερεολιθογραφία, ειδικό υλικό μπορεί να παρέχει επιπρόσθετη στήριξη στο μοντέλο, το οποίο αργότερα θα διαλυθεί στο νερό για να απομακρυνθεί.



Τρισδιάστατη εκτύπωση (3-Dimensional Printing)

Σε αυτή την μέθοδο το μοντέλο κατασκευάζεται σε ένα δοχείο με σκόνη από άμυλο ή γύψο. Το πρόγραμμα CAD υπολογίζει τις κινήσεις που θα εκτελέσει η κεφαλή για όλα τα στρώματα. Η κεφαλή του εκτυπωτή εφαρμόζει μια μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού για να σχηματίσει μια στρώση. Πριν η κεφαλή περάσει για την επόμενη στρώση, ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται, η επιφάνεια χαμηλώνει όσο είναι το πάχος της στρώσης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο.



Ιστορική αναδρομή

Η διαδικασία της ΠΚ έχει τις ρίζες της στην δεκαετία του 1980. Το 1981 ο Hideo Kodama εφεύρε δύο τεχνικές ΠΚ για την κατασκευή πλαστικών με πολυμερές που σκλήρηνει με την έκθεση του στο φως. Τον Ιούλιο του 1984 οι Γάλλοι Alain Le Méhauté, Olivier de Witte και Jean Claude André κατέθεσαν μια πατέντα στερεολιθογραφικής διαδικασίας που απορρίφθηκε για την έλλειψη επιχειρηματικής προοπτικής. Τρεις μήνες αργότερα, ο Αμερικανός Chuck Hull ανέπτυξε ένα πρωτότυπο όπου ο ίδιος το χαρακτήρισε ως "Σύστημα για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με τη δημιουργία ενός σχεδίου σε τομή του αντικειμένου που πρόκειται να σχηματιστεί". Δυστυχώς, αυτή η τεχνική είχε ήδη αναπτυχθεί από τον Kodama και ως αποτέλεσμα ο Hull αναγνωρίζεται για την προσφορά του στην σχεδίαση της STL μορφή αρχείων που είναι ευρέως αποδεκτή από τα λογισμικά τρισδιάστατης εκτύπωσης και τις

τεχνικές ψηφιακής τομής και πλήρωσης που συναντώνται ακόμα και σήμερα. Οι περισσότερες μέθοδοι αναπτύχθηκαν χρονικά παράλληλα με την στερεολιθογραφία, η νεότερη από αυτές είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση που δημιουργήθηκε το 1995 στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο Μασαχουσέτης.

CNC μηχανές

Οι μηχανές τύπου CNC είναι αυτοματοποιημένα εργαλεία που εκτελούν προγραμματισμένες αλληλουχίες εντολών μηχανής. Σε αντίθεση με τις χειροκίνητες μηχανές, δεν ελέγχονται από μοχλούς, τροχούς χειρός ή έκκεντρα. Η μορφή και οι διαστάσεις του προϊόντος καθορίζονται με ένα λογισμικό σχεδιασμού με την βοήθεια Η/Υ (CAD) ενώ η μετάφραση σε κατασκευαστικές οδηγίες γίνεται με ένα λογισμικό κατασκευής με την βοήθεια Η/Υ (CAM). Στην συνέχεια, οι οδηγίες αυτές μεταφράζονται σε συγκεκριμένες εντολές που μπορεί να ακολουθήσει το εκάστοτε μηχάνημα και φορτώνονται στον μικροελεγκτή του CNC μηχανήματος. Σήμερα, πολλά μηχανήματα ενσωματώνουν διαφορετικά εργαλεία, όπως τρυπάνια, τροχούς κοπής και αρπάγες, στην ίδια μονάδα ώστε να παράγουν πιο περίπλοκα και απαιτητικά σχέδια. Σε μεγαλύτερες μονάδες, πολλές CNC μηχανές ελέγχονται από έναν κεντρικό ελεγκτή και ανθρῶπινοι ή ρομποτικοί χειριστές μετακινούν το κομμάτι στα διάφορα στάδια επεξεργασίας του. Σε όλες τις περιπτώσεις, η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη και το τελικό προϊόν είναι ίδιο με το αρχικό σχέδιο. Οι μηχανές χαρακτηρίζονται για την ακρίβεια τους χάρη στους σερβοκινητήρες και τους βηματικούς κινητήρες που διαθέτουν. Μικρότερες μηχανές υλοποιούν κινήσεις ανοιχτού βρόγχου, αφού οι δυνάμεις και η ταχύτητα είναι χαμηλές, ενώ σε συστήματα βιομηχανικών προδιαγραφών είναι απαραίτητη η χρήση κλειστών βρόγχων για να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα, η ευστοχία και η επαναληψιμότητα. Συχνά, τα κινούμενα μέλη της CNC μηχανής είναι τοποθετημένα σε προστατευτικούς κλωβούς για την ασφάλεια του χειριστή. Αυτό συμβαίνει λόγω απουσίας της αίσθησης του περιβάλλοντος της μηχανής που μπορεί να βλάψει το υλικό, τα κινούμενα μέρη της, ακόμα και τον χειριστή.



Βηματικοί κινητήρες

Ο βηματικός κινητήρας (stepper motor) είναι ένας ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος όπου μια πλήρη περιστροφή ισούται με έναν αριθμό ίσων βημάτων. Η τοποθέτηση του κινητήρα μπορεί να διεξαχθεί και διατηρηθεί χωρίς την χρήση κάποιου αισθητήρα, άρα αποτελεί έναν ελεγκτή ανοιχτού βρόγχου. Η χρήση τους γίνεται σε εφαρμογές που απαιτείται ακρίβεια τόσο στην θέση όσο και στην ταχύτητα του ρότορα. Οι βηματικοί κινητήρες έχουν οδοντωτούς μαγνήτες γύρω από τον ρότορα. Οι ηλεκτρομαγνήτες του στάτη ενεργοποιούνται από έναν οδηγό ή έναν ελεγκτή ικανό για παραγωγή παλμοσειράς. Για να κινηθεί ο στάτης, πρώτα ενεργοποιείται ένας ηλεκτρομαγνήτης. Ο οδοντωτός ρότορας ευθυγραμμίζεται με τα δόντια του πρώτου μαγνήτη και ταυτόχρονα δημιουργεί μια μικρή απόκλιση με τον επόμενο σε σειρά μαγνήτη. Στην συνέχεια, όταν ενεργοποιηθεί ο δεύτερος ηλεκτρομαγνήτης, ο ρότορας θα ευθυγραμμιστεί με αυτόν και θα δημιουργήσει και πάλι μια απόκλιση με τον τρίτο. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται και κάθε παλμός μετακινεί τον άξονα με συγκεκριμένες μοίρες. Με λίγα λόγια, η λειτουργία τους είναι να μεταφράζουν σειρές παλμών σε μεταβολές του άξονά τους. Αποτελούν κινητήρες γωνιακής θέσης, σε αντίθεση με τις συμβατικές μηχανές που είναι στροφών και έχουν ευρεία χρήση στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Υπάρχουν τρία είδη κινητήρων, κινητήρας μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης (Variable reluctance stepper motors), μόνιμου μαγνήτη βηματικός κινητήρας (Permanent magnet stepper motors) και υβριδικός βηματικός κινητήρας (Hybrid stepper motor).

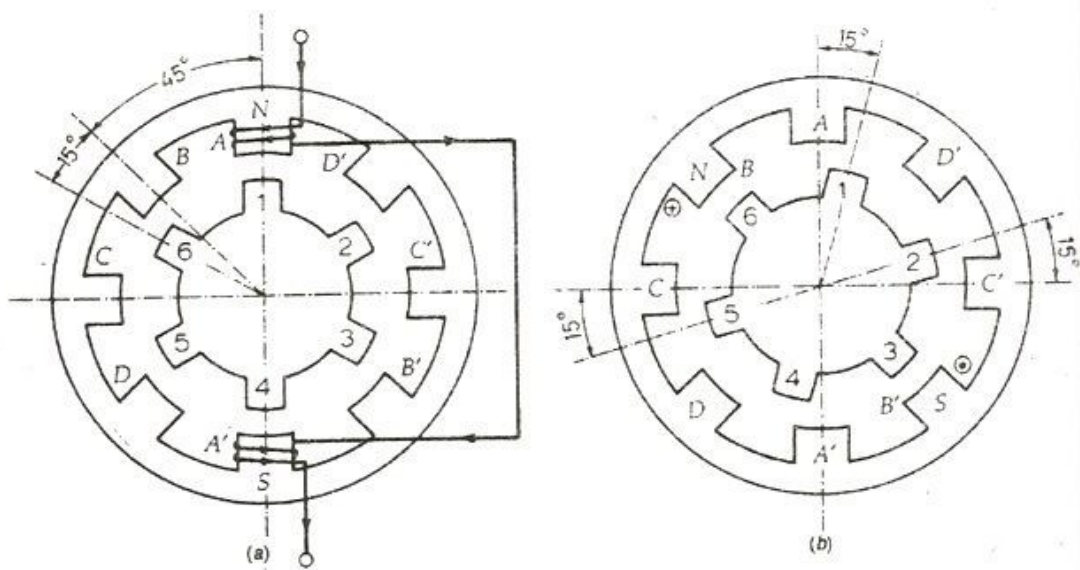
Κινητήρας μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης

Οι βηματικοί μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης κατασκευάζονται σε δύο παραλλαγές, σε αυτούς με μονό τμήμα δρομέα (single stack rotor) και σε αυτούς με πολλαπλά τμήματα δρομέα (multi stack rotor). Ο στάτης και ο δρομέας είναι κατασκευασμένοι σε στρώσεις για να αποφεύγεται η ανάπτυξη δινορευμάτων ανάμεσα τους. Τέτοιοι κινητήρες τροφοδοτούνται

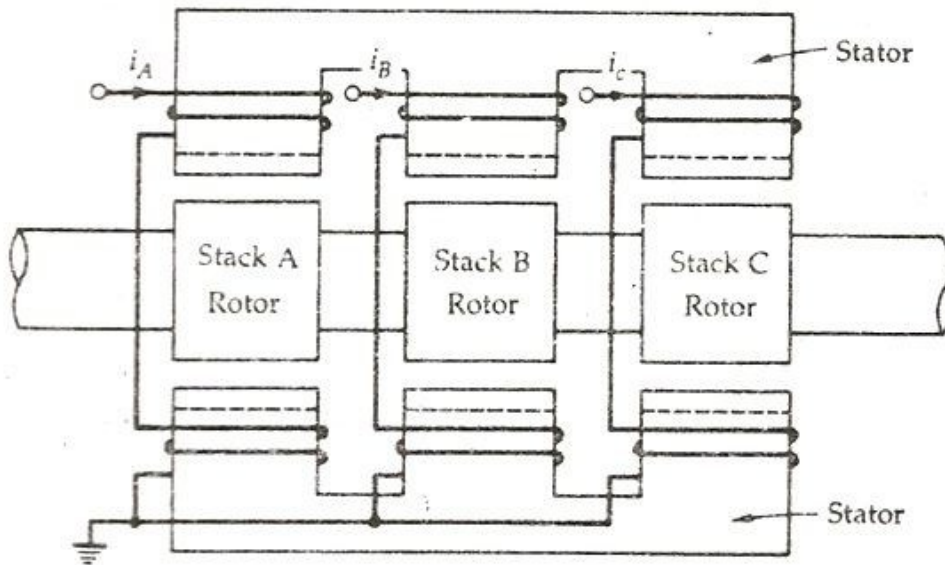
διαδοχικά σε κάθε ένα από τα τυλίγματα τους και μπορεί εύκολα να αλλάξει η φορά περιστροφής, αντιστρέφοντας την σειρά πυροδότησης των τυλιγμάτων. Ακόμα, μπορούμε να υπολογίσουμε το βήμα του δρομέα ή του στάτη, αν γνωρίζουμε τον αριθμό των οδόντων τους. Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζουμε ότι

$$P = \frac{360}{N}$$

Όπου: P το βήμα οδόντων του δρομέα ή στάτη σε μοίρες και N ο αριθμός των οδόντων του δρομέα ή στάτη.

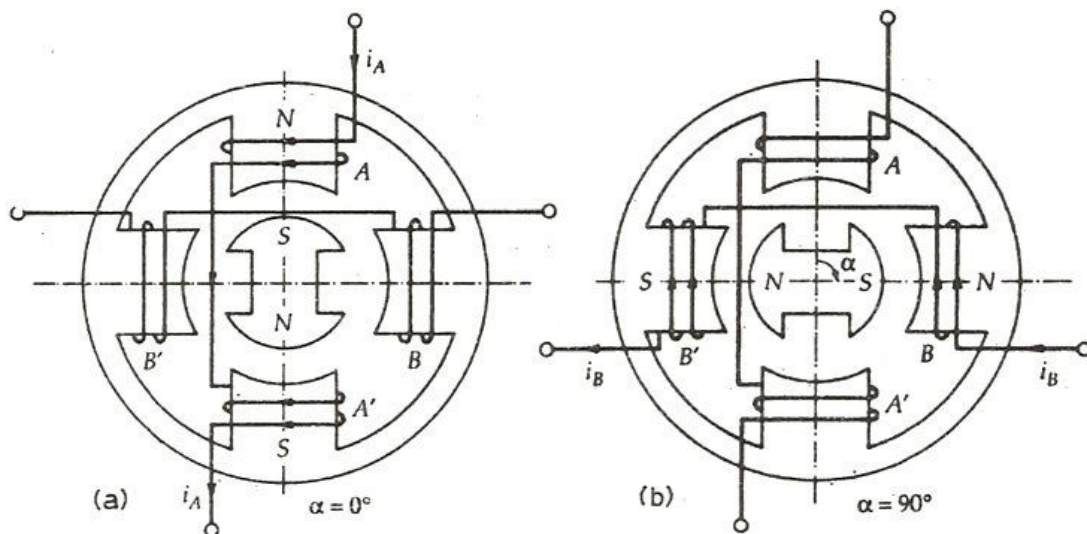


Αντίθετα, οι βηματικοί μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης με πολλαπλά τμήματα δρομέα, το κάθε τμήμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ξεχωριστός ηλεκτρικός κινητήρας που διαθέτει δικό του τύλιγμα στάτη, δρομέα και μαγνητικό κύκλωμα. Είναι έτσι κατασκευασμένος ώστε η φορά ενός τυλίγματος να είναι πάντα αντίθετη με αυτή του διπλανού. Μάλιστα, πολλοί κατασκευαστές δίνουν την επιλογή ο χρήστης να ρυθμίσει το βήμα του κινητήρα με την προσθήκη τμημάτων. Με αυτό τον τρόπο, ένα κινητήρας δύο τμημάτων και 16 οδοντών έχει γωνία βήματος ίσο με 10° , ενώ ο ίδιος κινητήρας με τρία τμήματα έχει γωνία βήματος 7.5° .



Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

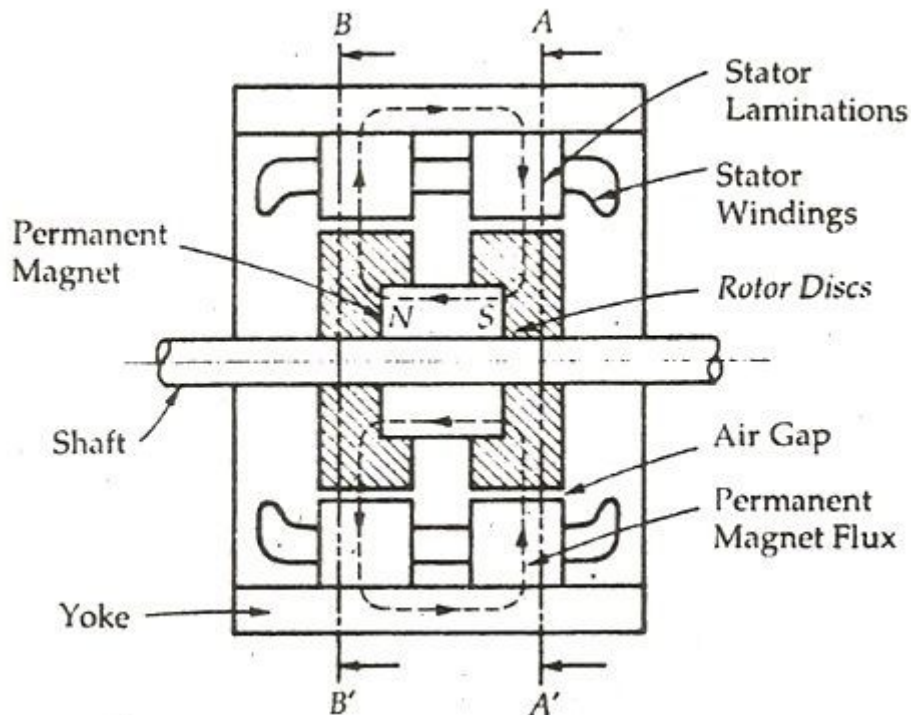
Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη διαφέρουν από αυτούς μαγνητικής αντίστασης, αφού ο δρομέας τους αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες χωρίς οδοντωτές εγκοπές. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας τους, μπορούν και συγκρατούν την τελευταία θέση τους, ακόμα και όταν αποσυνδεθούν από την τροφοδοσία. Τα απέναντι τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το βήμα σε βηματικούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη κυμαίνεται από 7.5° μέχρι 90° . Για την αλλαγή της φοράς της μηχανής αρκεί να ενεργοποιηθούν τα τυλίγματα με την φορά που επιθυμεί ο χρήστης.



Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες ενσωματώνουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, όπως οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Αντίθετα, ο

στάτης είναι κατασκευασμένος όπως ένας κινητήρας μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης. Οι μαγνητικές γραμμές κατευθύνονται από τον βόρειο πόλο του μόνιμου μαγνήτη στους πόλους των τυλιγμάτων και κλείνουν μέσω του νότιου πόλου του μαγνήτη. Αυτοί οι κινητήρες, κατασκευαστικά φέρνουν σε κινητήρα μεταβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης δύο τμημάτων. Παράλληλα, η χρήση του μόνιμου μαγνήτη για την παρεμβολή του μαγνητικού πεδίου φέρνει στο φαινόμενο που παρατηρείται στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.



Βηματικοί κινητήρες δύο φάσεων

Υπάρχουν δύο βασικές περιτυλίξεις των συρμάτων χαλκού για την δημιουργία των ηλεκτρομαγνητικών πηνίων ενός stepper, διπολική και μονοπολική.

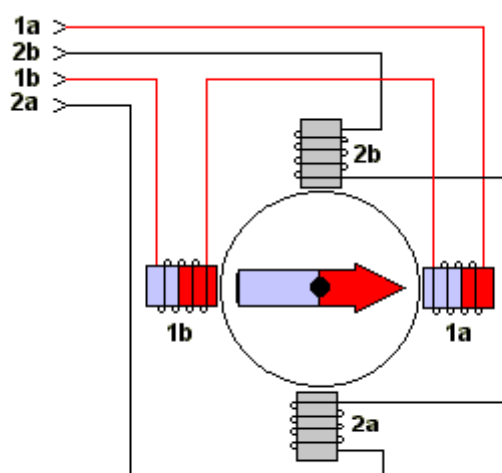
Μονοπολικά βηματικά μοτέρ.

Ένα μονοπολικό βηματικό μοτέρ (unipolar stepper motor) έχει ένα τύλιγμα με μια κεντρική επαφή (center tap) ανά φάση. Κάθε τμήμα του τυλιγματος ενεργοποιείται για κάθε διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτή την τοποθέτηση, ο μαγνητικός πόλος μπορεί να αντιστραφεί χωρίς να αλλαχθεί η φορά του ρεύματος και ως αποτέλεσμα το κύκλωμα οδήγησης μπορεί να γίνει πολύ απλό, λόγω χάρη ένα τρανζίστορ ανά τύλιγμα. Τυπικά, η κεντρική επαφή σε κάθε τύλιγμα είναι κοινή, δίνοντας τρία καλώδια ανά φάση δηλαδή έξι σε ένα κοινό κινητήρα δύο φάσεων. Μάλιστα, οι δύο κεντρικές επαφές είναι εσωτερικά γεφυρωμένες άρα το μοτέρ έχει μόνο πέντε

καλώδια. Ένας μικροελεγκτής μπορεί να οδηγήσει τα τυλίγματα με την σωστή σειρά και εύκολα αποτελεί την δημοφιλή επιλογή ανάμεσα στους ερασιτέχνες που θέλουν μια οικονομική λύση για να καταφέρουν ακριβή γωνιακή κίνηση.

Διπολικά βηματικά μοτέρ

Τα διπολικά βηματικά μοτέρ (Bipolar stepper motors) έχουν ένα τυλίγμα ανά φάση. Το ρεύμα σε κάθε τυλίγμα πρέπει να αναστραφεί ώστε να αντιστραφεί ο μαγνητικός πόλος. Η κύκλωμα οδήγησης συνήθως περιλαμβάνει μια γέφυρα τύπου H, συνεπώς αποτελεί μια πιο περίπλοκη λύση. Υπάρχουν δύο καλώδια ενσωματωμένα στην κάθε φάση, κανένα από αυτά δεν είναι κοινά. Επειδή τα τυλίγματα χρησιμοποιούνται καλύτερα είναι πιο ισχυρά σε σχέση με ένα μονοπολικό κινητήρα ίσιου μεγέθους. Αυτό οφείλεται στο φυσικό χώρο που καταλαμβάνουν τα πηνία. Ένα μονοπολικό μοτέρ χρησιμοποιεί μόνο το 50% των τυλιγμάτων του σε κάθε δεδομένη στιγμή και ως αποτέλεσμα έχει μόνο το 50% της απόδοσης. Παρά την πολυπλοκότερη οδήγηση του διπολικού κινητήρα, η αφθονία των κυκλωμάτων οδήγησης απλουστεύει την διαδικασία.



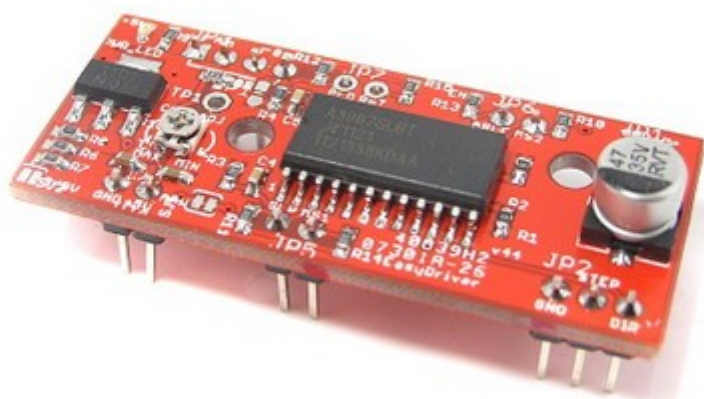
Conceptual Model of Bipolar Stepper Motor

Ταυτόχρονα, υπάρχουν και stepper οκτώ καλωδίων που επιτρέπουν πολλές διαφορετικές συνδέσεις, όπως μονοπολική, διπολική με διέγερση σειράς, διπολική με παράλληλη διέγερση και διπολική με μία φάση ανά τυλίγμα.

Οδηγοί μοτέρ

Οι οδηγοί ηλεκτρικών κινητήρων είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που σαν λειτουργία έχουν την οδήγηση της θέσης, της ροπής και της

ταχύτητας των ηλεκτρικών κινητήρων με σκοπό την αποτελεσματική ανταπόκριση της μηχανής στις ανάγκες του φορτίου. Ο μετατροπέας ισχύος ελέγχει μία ή ένα σύνολο των παραπάνω μεταβλητών και τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα με το ανάλογο ρεύμα και τάση. Όταν ο μετατροπέας ενσωματώνεται σε συστήματα κλειστού βρόγχου, λαμβάνει σήμα από την βαθμίδα ανατροφοδότησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι κινητήρες είναι συνεχούς ρεύματος και οι οδηγοί τους είναι πιο απλοί στην κατασκευή, έχουν μικρότερο κόστος και μπορούν να αποκριθούν πιο γρήγορα. Για αυτό τον σκοπό ενσωματώσαμε τους οδηγούς A3967SLB της Allegro MicroSystems, σχεδιασμένους για την λειτουργία διπολικών βηματικών κινητήρων. Το συγκεκριμένο κύκλωμα μπορεί να κινήσει τον δρομέα κατά ένα, μισό, ένα τέταρτο και ένα όγδοο του βήματος του κάθε κινητήρα. Ακόμα, τροφοδοτεί την μηχανή με 30 V τάσης και μέχρι 750 mA ρεύματος. Ο A3967SLB ενσωματώνει δικό του μεταφραστή και μπορεί να προγραμματιστεί με σχετική ευκολία και ενεργοποιείται με παλμούς που εξαγει το μικροϋπολογιστής Arduino. Το ρεύμα στις εξόδους των δύο γεφυρών τύπου H ρυθμίζεται από παλμό διαμορφωμένου πλάτους (PWM).

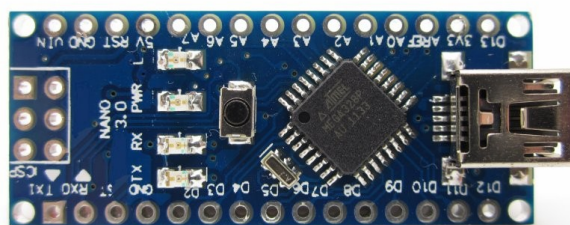


Arduino

Τα Arduino είναι μια σειρά μικροϋπολογιστών που κατασκευάζονται ως λύση για ερασιτέχνες και επαγγελματίες στην επικοινωνία και αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον. Τα προϊόντα είναι ανοικτού κώδικα και υλικού, που σημαίνει ότι ο καθένας μπορεί να τα κατασκευάσει και να τα διαθέσει στην αγορά. Το Arduino λειτουργεί με την γλώσσα προγραμματισμού Wiring C, η οποία έχει την βάση της στην C++ και μέσω βιβλιοθηκών είναι δυνατόν να επεκταθούν οι δυνατότητες της. Τα πλεονεκτήματα της οικογένειας Arduino περιλαμβάνουν την απλότητα του περιβάλλοντος ανάπτυξης, την συμβατότητα με τα περισσότερα λειτουργικά περιβάλλοντα, το

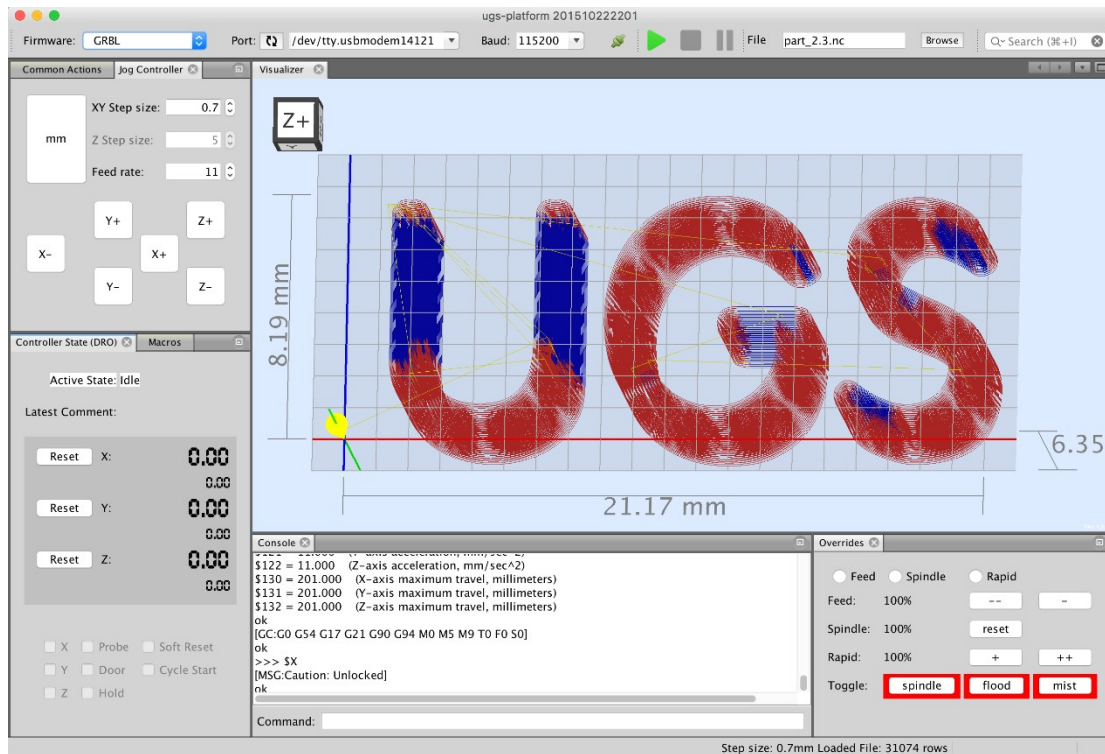
χαμηλό κόστος πώλησης των πλακετών Arduino και το λογισμικό ανοιχτού κώδικα που μπορεί να τροποποιηθεί από τον οποιοδήποτε. Οι εκδόσεις του Arduino είναι πολλές, όλες όμως υλοποιούνται με μικροϋπολογιστές της Atmel με διαφορές στις δυνατότητες από μοντέλο σε μοντέλο. Γενικά, οι ακροδέκτες του χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, εισόδου/εξόδου και τροφοδοσίας. Ένα Arduino είναι ικανό να αναγνωρίσει αναλογικά σήματα, από 0V μέχρι 5V και ψηφιακά, 0V ή 5V και να τροφοδοτήσει με τάση 3.3V ή 5V και ρεύμα ως 30-40mA ένα περιφερειακό. Επιπλέον, ενσωματώνει μια θύρα USB για την επικοινωνία με τον υπολογιστή και την τροφοδοσία του.

Για τις ανάγκες μας ενσωματώσαμε ένα Arduino Nano, όμως οι αρχικές δοκιμές έγιναν με ένα Arduino Uno. Αμφότερα χρησιμοποιούν έναν μικροελεγκτή της Atmel, πιο συγκεκριμένα τον ATmega328P, με μοναδική διαφορά το μικρότερο μέγεθος του Nano. Ο ATmega328P απαιτεί 5V τάσης και καταναλώνει 19mA. Το εσωτερικό του ρολόι έχει συχνότητα 16MHz, διαθέτει 2KB SRAM, 1KB EEPROM και 32KB μνήμη. Ακόμα, μπορεί να εφαρμόσει ρεύμα 40mA στις 22 ακίδες I/O, καθώς και 6 διαφορετικούς παλμούς PWM. Η πλακέτα που στεγάζει όλα τα υλικά έχει διαστάσεις 18 x 45mm, ενώ το βάρος του δεν ξεπερνάει τα 7g. Η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει από την θύρα Mini-B USB, όμως έχει είσοδο ασταθής τάσης από 6-20V και είσοδο σταθερής τάσης 5V. Οι pull-up αντιστάσεις είναι απενεργοποιημένες από προεπιλογή και μετρούν 20-50kOhm. Για τον προγραμματισμό του μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Arduino IDE πλατφόρμα. Η συγκεκριμένη διανέμεται δωρεάν από την εταιρία και προσφέρει την δυνατότητα προγραμματισμού οποιουδήποτε μοντέλου Arduino. Θεωρητικά, ο κώδικας μπορεί να γραφτεί σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού σε έναν μεταγλωττιστή που παράγει δυαδικό κώδικα μηχανής. Στο Arduino IDE ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει σε Java, C και C++.



CAD Προγράμματα

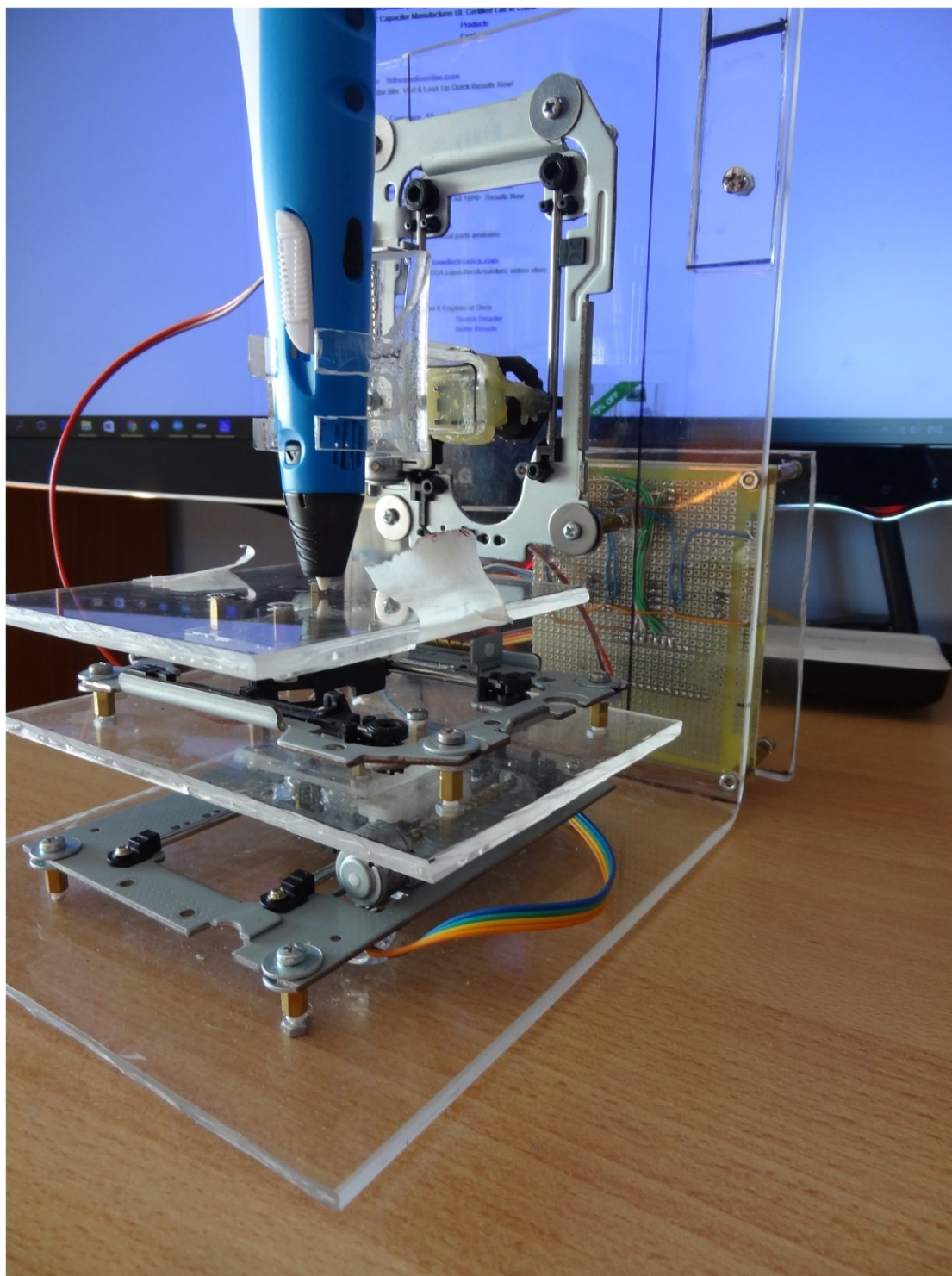
Το ακρωνύμιο CAD σημαίνει Computer Aided Design δηλαδή σχεδιασμός με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Εδώ γίνεται ο σχεδιασμός του προϊόντος σε ένα γραφικό περιβάλλον και η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου. Ο χρήστης με την βοήθεια του Η/Υ σχεδιάζει ένα τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο στο πρόγραμμα CAD, όπου μπορεί να εκτελέσει προσομοιώσεις, βελτιώσεις και δοκιμές. Ακόμα, ο χειριστής οφείλει να εισάγει το στερεό με ακρίβεια στις διαστάσεις, τις ανοχές και τα γεωμετρικά του στοιχεία, έτσι ώστε το παραγόμενο μοντέλο να είναι κοντά στο πρωτότυπο. Αν το μοντέλο αποτελείται από πολλαπλά επιμέρους κομμάτια, είναι απαραίτητο να σχεδιαστούν όλα και να συναρμολογηθούν στην συνέχεια. Τα περισσότερα CAD προγράμματα έχουν σχεδιαστεί για τεχνικές αφαιρετικής κατασκευής, όμως τα τελευταία χρόνια έχει προστεθεί λογισμικό που καλύπτει τις ανάγκες της προσθετικής κατασκευής. Αρκετά από τα λογισμικά αυτά είναι ανοιχτού κώδικα και διανέμονται δωρεάν από τους δημιουργούς τους. Αρχικά, για τις ανάγκες της δική μας CNC μηχανής πειραματιστήκαμε πρώτα με το Grbl και στην συνέχεια με το Universal Gcode Sender. Το Grbl αποτελεί ένα δωρεάν και ανοιχτού κώδικα πρόγραμμα ελέγχου CNC μηχανών. Υποστηρίζει τις περισσότερες εντολές του G κώδικα και είναι ενσωματωμένο σε κάθε τρισδιάστατο εκτυπωτή μικρής κλίμακας και συνεργάζεται με τα περισσότερα εργαλεία CAM. Η περιορισμένη υποστήριξη της γλώσσας G καθιστά το πρόγραμμα απλό, χωρίς μεγάλες απαιτήσεις και εύκαμπτο σε αλλαγές. Το Universal Gcode Sender έχει παρόμοιες λειτουργίες και δυνατότητες με το Grbl. Λειτουργεί σε περιβάλλον Java και προσφέρει γραφική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.



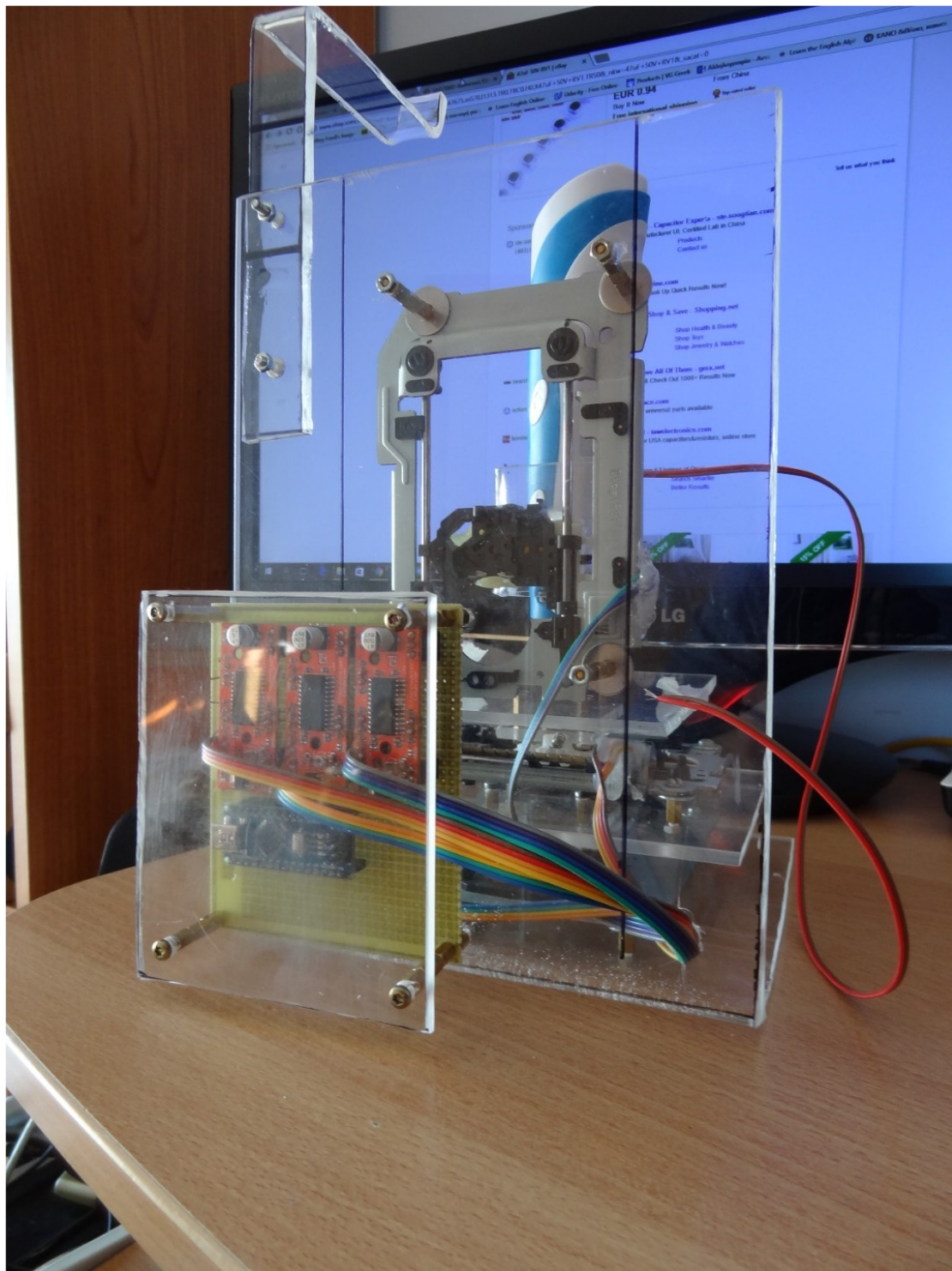
Κατασκευή

Η κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή απαιτεί εργαλεία υψηλής τεχνολογίας, ώστε να επιτευχθεί ακρίβεια στην κατασκευή. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση ενός CNC μηχανήματος που θα αναλάβει να δημιουργήσει τους άξονες και τις οπές της κατασκευής. Σε περίπτωση που δεν γίνουν σωστά οι οπές ή με λάθος διάμετρο, το σύστημα θα έχει κενά και συνεπώς δεν θα είναι δυνατή η κατασκευή ενός πιστού αντιγράφου. Κατά την διάρκεια της κατασκευής, είχαμε σαν κύριο γνώμονα την υλοποίηση του τρισδιάστατου εκτυπωτή με υλικά φθηνά και απλά. Αυτό βοηθάει στην εύκολη μελλοντική αναπαραγωγή της ιδέας, αλλά και στην διατήρηση της απλότητας της. Παρατηρήσαμε ότι οι μονάδες ανάγνωσης οπτικών δίσκων βασίζονται σε παρόμοια δομή και μετά από δοκιμές καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι μπορούν να λειτουργήσουν σαν άξονες τρισδιάστατου εκτυπωτή. Επιπροσθέτως, οι οδηγοί οπτικών μέσων αποτελούν μια φθηνή τεχνολογία, ενώ κάλλιστα μπορούν να χρησιμοποιηθούν παλιοί οδηγοί ώστε να γίνει ανακύκλωση άχρηστων ηλεκτρονικών. Για ευκολία, αποδεσμεύσαμε τα περιττά εξαρτήματα του συστήματος ανάγνωσης, όπως οι ηλεκτρονικές πλακέτες, τα μεταλλικά κελύφη, τα πλαστικά μέρη και κρατήσαμε την βάση που στηρίζονται οι άξονες, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και τον ηλεκτροκινητήρα. Προσπαθήσαμε να τα διατηρήσουμε ελαφριά ώστε να μην καταπονούνται οι κινητήρες αλλά και για να μην δημιουργήσουμε μια βαριά τελική κατασκευή.

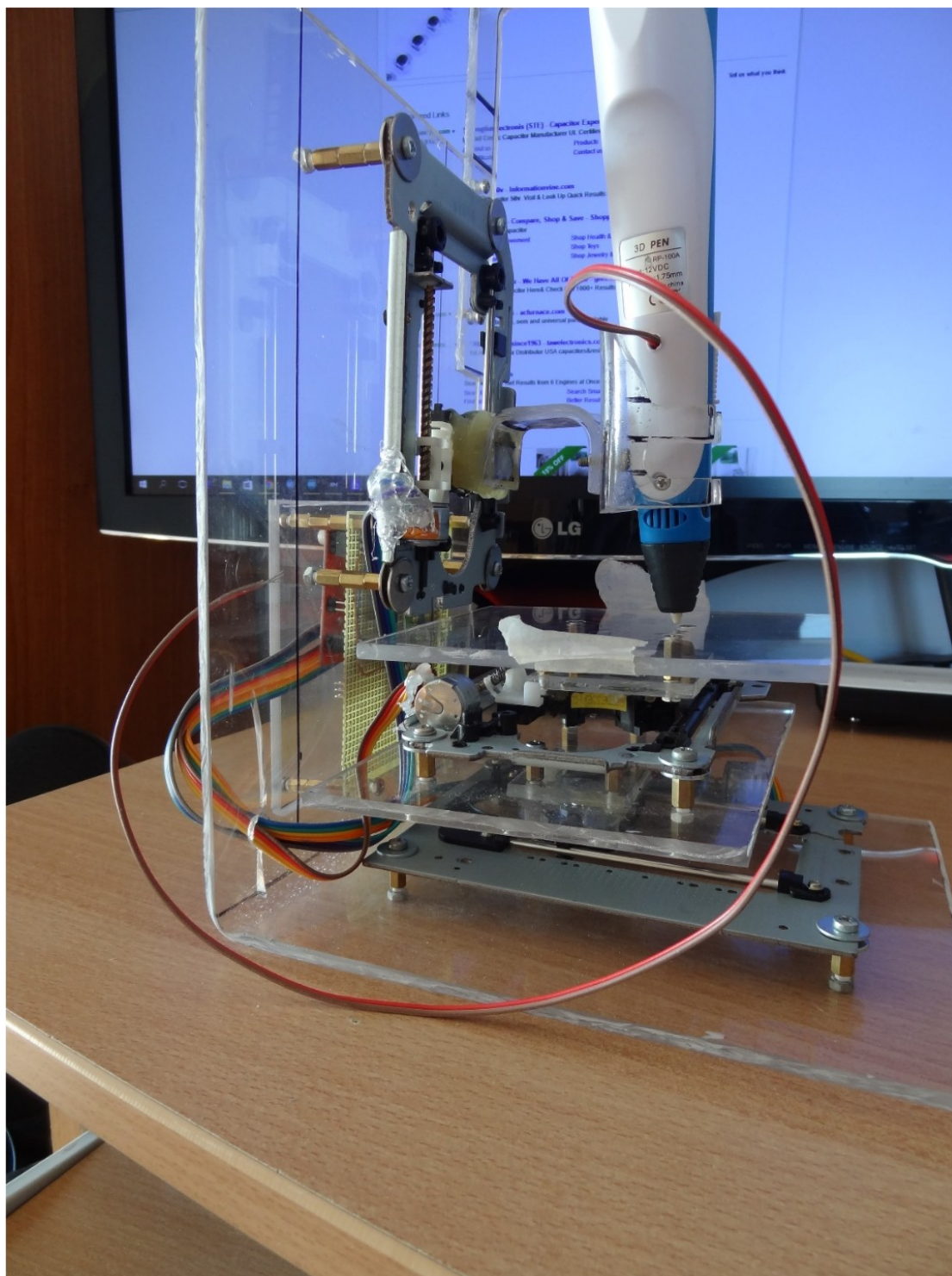
Αυτό το εμπόδιο καταφέραμε να το ξεπεράσουμε με την χρήση τριών μονάδων οπτικών δίσκων. Για την ανάγνωση ενός οπτικού δίσκου χρειάζεται κίνηση χιλιοστών, όπως και στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Η βάση του εκτυπωτή έγινε με Plexiglas, κυρίως για λόγους αισθητικούς. Σχεδιάσαμε και κόψαμε το υλικό με έναν φορητό ηλεκτρικό τροχό. Στην συνέχεια, με θερμική επεξεργασία εφαρμόσαμε γωνία 90 μοιρών για να δημιουργήσουμε την πλάτη που θα στεγάζει τον άξονα Z και το κύκλωμα χειρισμού. Στο κάτω μέρος στερεώσαμε μία από τις τρεις μονάδες, ενώ από πάνω την δεύτερη σε εγκάρσια διάταξη. Ονομάσαμε αυτούς τους δύο άξονες X και Y αντίστοιχα. Μια μικρή επιφάνεια Plexiglas βιδώθηκε και ενισχύθηκε με κόλλα πάνω στον άξονα X ώστε να παρέχει ένα σταθερό και λείο επίπεδο για την στήριξη του άξονα Y. Λόγω της ιδιόμορφης κατασκευής των μονάδων οπτικών δίσκων, χρησιμοποιήσαμε αποστάτες για να μην έρθουν σε επαφή και καταστραφούν κατά την διάρκεια της λειτουργίας. Τέλος, δημιουργήσαμε μια δεύτερη επιφάνεια, πάνω στην οποία θα απλώνονται οι στρώσεις του υλικού. Οι οπές επεξεργάστηκαν με φρέζα ώστε οι βίδες στερέωσης να μην διαταράσσουν την επιφάνεια εκτύπωσης. Παράλληλα, στην πλάτη της κατασκευής φροντίσαμε να βιδώσουμε τον άξονα Z ευθύγραμμα και τον μεταφέραμε προς το κέντρο της επιφάνειας εκτύπωσης με αποστάτες. Από το υπόλοιπο φύλλο, σχεδιάσαμε, κόψαμε και με θερμική επεξεργασία διαμορφώσαμε κατάλληλα την θήκη του μηχανισμού διάθεσης υλικού. Τέλος, στο πίσω μέρος της πλάτης του εκτυπωτή τοποθετήσαμε μια διάτρητη πλακέτα και συγκολλήσαμε πάνω σε βάσεις τους τρεις οδηγούς των βηματικών κινητήρων και τον Arduino Nano, ενώ προσθέσαμε και ένα προστατευτικό κάλυμμα από Plexiglas. Αυτό επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην στιγμή χωρίς να απαιτείται εκ νέου ψυχρή κόλληση.



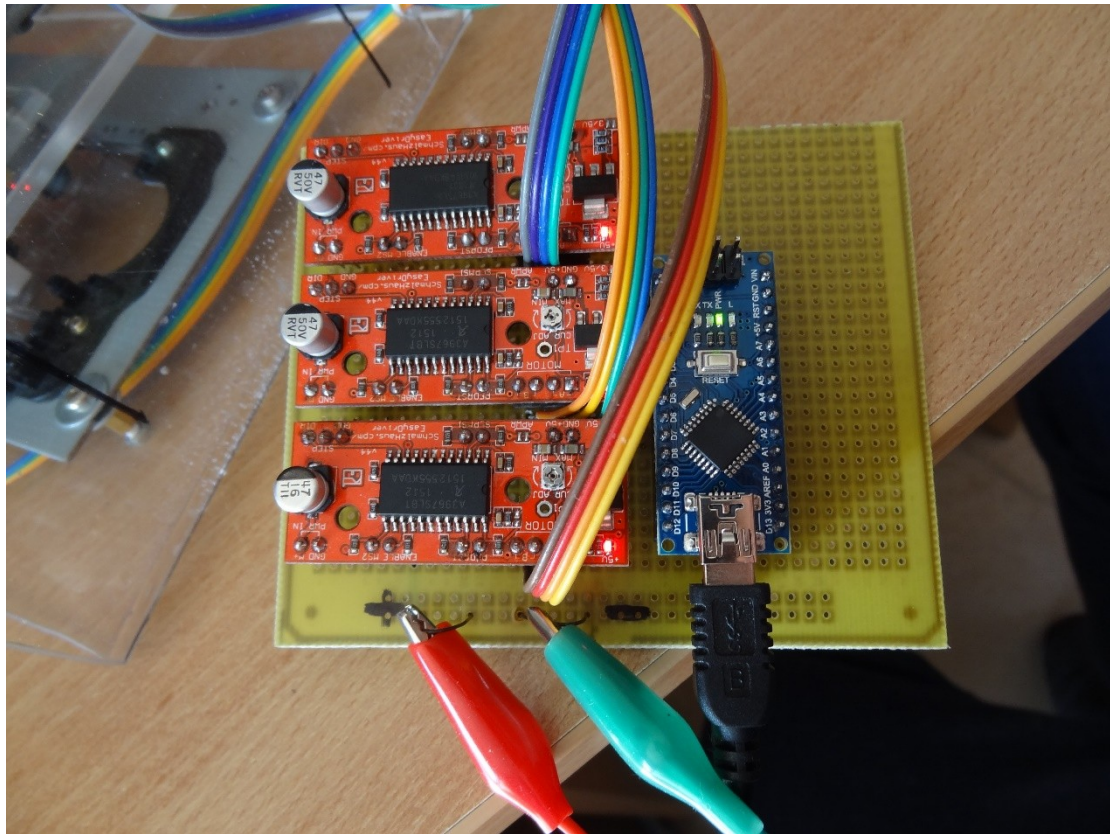
Εικόνα 1 - Η μπροστά όψη του εκτυπωτή.



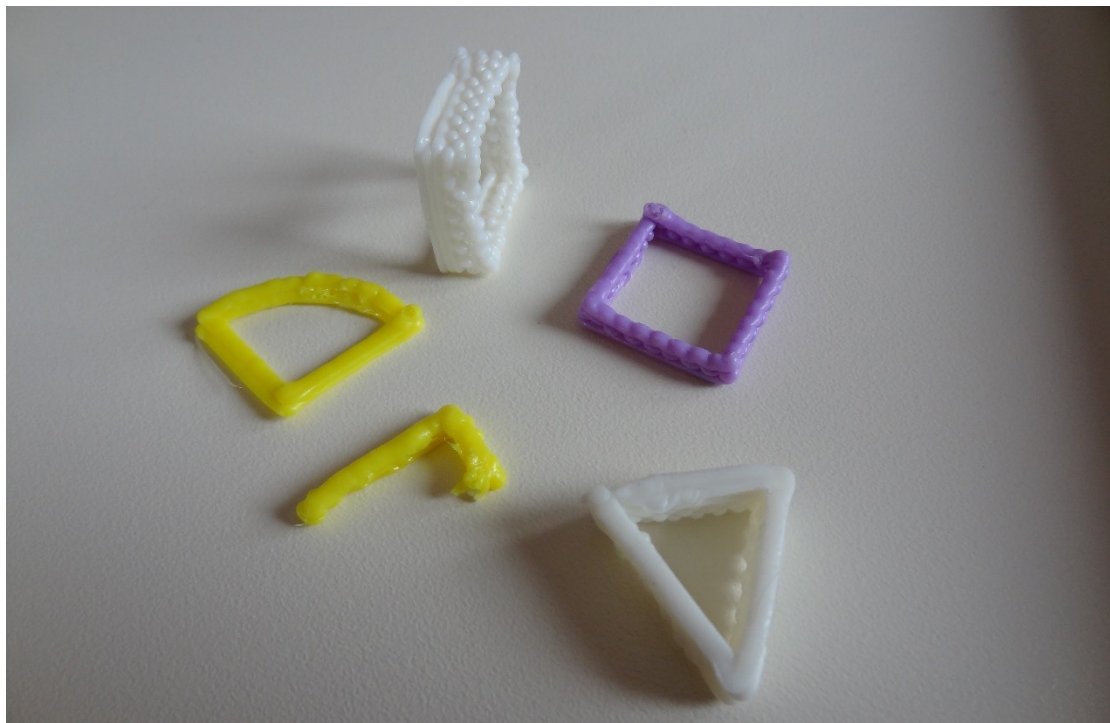
Εικόνα 2 - Η πίσω όψη του εκτυπωτή.



Εικόνα 3 - Πλάγια όψη του εκτυπωτή.



Εικόνα 4 - Η διάτρητη πλακέτα που φιλοξενεί τους οδηγούς και το Arduino Nano



Εικόνα 5 - Διάφορα σχήματα που έχουν υλοποιηθεί με την χρήση του 3D εκτυπωτή.

Προγραμματισμός

Αφού ολοκληρώσαμε την κατασκευή του εκτυπωτή, σειρά είχε ο προγραμματισμός του. Πρώτο μέλημα μας ήταν να δοκιμάσουμε τις δυνατότητες των βηματικών κινητήρων. Ο κάθε παλμός μεταφράζεται σε 0.1 mm κίνησης του κάθε άξονα, με τον μέγιστο ωφέλιμο όγκο του εκτυπωτή να φτάνει τα 38 x 38 x 38 mm. Ακόμα, η δύναμη που μεταφέραν οι κινητήρες στους δρομείς τους ήταν αρκετή για να κινήσουν τα εξαρτήματα που φέρουν οι άξονες χωρίς προβλήματα. Στον μικροελεγκτή προγραμματίσαμε έναν απλό μεταφραστή κώδικα G που λαμβάνει εντολές από τον χρήστη και τις μετατρέπει σε κινήσεις των αξόνων. Οι εντολές δίνονται μέσω προγράμματος ανοιχτού κώδικα στον μικροελεγκτή σειριακά.

Οι εξισώσεις κίνησης του εκτυπωτή βασίζονται στις γνωστές εξισώσεις ευθείας και κύκλου. Για την ευθύγραμμη κίνηση, χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση του πυθαγόρειου θεωρήματος. Ο χρήστης εισάγει τα x και y και το πρόγραμμα υπολογίζει την υποτείνουσα του δεδομένου τριγώνου, δηλαδή την ευθεία κίνησης που θα ακολουθήσει η κεφαλή. Η εξίσωση έχει την μορφή

$$x^2+y^2=d^2$$

όπου x , y είναι τα σημεία που έδωσε ο χρήστης και d το μήκος του ευθυγράμμου τμήματος που θα διαγράψει η κεφαλή. Για τον κύκλο, πάλι έχουμε την γνωστή εξίσωση κύκλου

$$(x+x_0)^2+(y+y_0)^2=r^2$$

όπου x_0, y_0 είναι η απόσταση του κύκλου από το κέντρο των αξόνων στο καρτεσιανό σύστημα και r η ακτίνα του κύκλου. Για την υλοποίηση των τόξων, το σύστημα ξεκινάει κανονικά την δημιουργία του κυκλικού σχεδίου και σταματάει στις συντεταγμένες που έχει δώσει ο χειριστής. Ακόμα είναι σημαντικό, όταν κινείται ευθύγραμμα οι άξονες x και y να φτάνουν στο τελικό σημείο ακόμα και όταν η απόσταση που έχουν να διανύσουν δεν είναι ίδια. Έτσι, υποδιαιρούμε την ταχύτητα κίνησης του άξονα που έχει αναλάβει να κινηθεί την μικρότερη απόσταση ώστε να φτάσουν στο τελικό σημείο ταυτόχρονα. Η εξίσωση της ταχύτητας είναι ίδια με την γνωστή εξίσωση

$$U=x*t$$

όπου U η ταχύτητα του κάθε άξονα, x η επιθυμητή απόσταση που θα κινηθεί και t ο χρόνος σε δευτερόλεπτα.

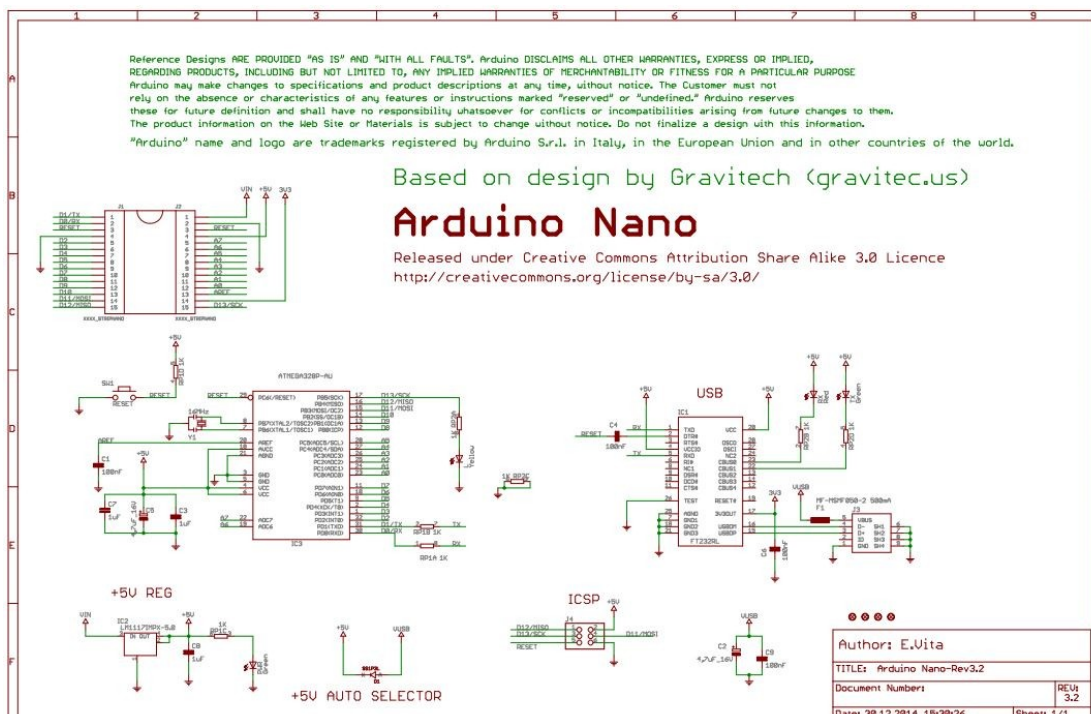
Συμπεράσματα

Καταφέραμε επιτυχώς να κατασκευάσουμε έναν οικονομικό τρισδιάστατο εκτυπωτή χρησιμοποιώντας ανταλλακτικά και φθηνά εξαρτήματα. Επιπλέον, η κατασκευή μπορεί να χειρισθεί ως CNC μηχανή αντικαθιστώντας το 3D στυλό με ένα άλλο εργαλείο, όπως ένα δράπανο ή ένα τροχό κοπής. Ο 3D εκτυπωτής θα χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς, με εργαστήρια μηχανολογίας και εργασίες ρομποτικής αλλά και για έρευνα. Η λειτουργία του ως εργαλείο εκμάθησης είναι ανεκτίμητη για τους μαθητές, τους φοιτητές και μεταπτυχιακούς φοιτητές. Δοκιμάσαμε παλιά και αχρησιμοποίητα υλικά ώστε να αυξήσουμε την οικονομική προσιτότητα αλλά και την ανακύκλωση ηλεκτρονικών απορριμμάτων. Μελλοντικά, θα προσθέσουμε απομακρυσμένη πρόσβαση μέσω ίντερνετ και αυτόματο τροφοδότη υλικού.

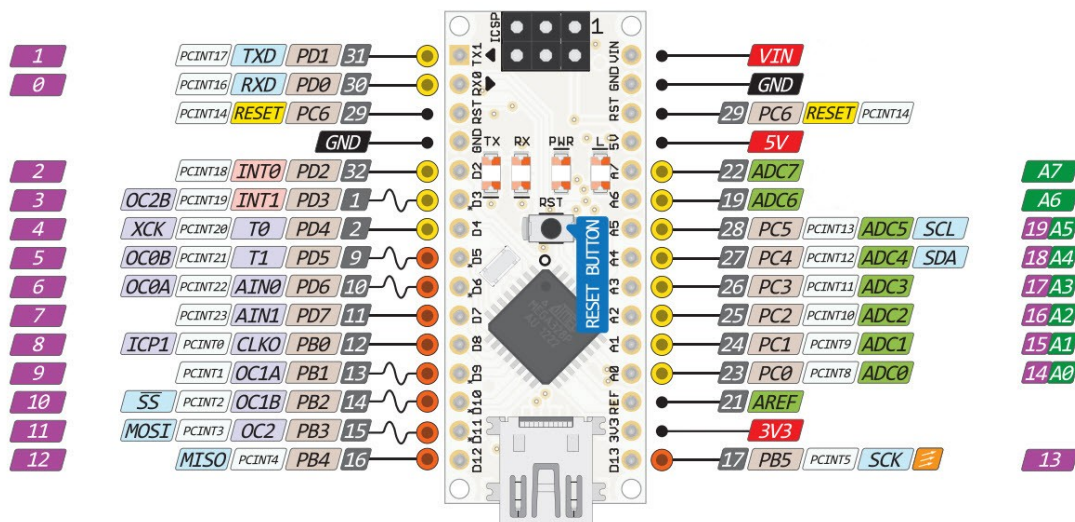
Αναφορές

- [1] Ν. Μπιλάλης, Ε. Μαραβελάκης, «Συστήματα CAD/CAM & Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση», 2^η έκδοση, Εκδόσεις Κριτική, Οκτώβριος 2014.
- [2] Stephen j. Charman, «Ηλεκτρικές μηχανές», 4^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014
- [3] Π. Β. Μαλατέστας, Μ. Τερζή, «Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας», 1^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2013.
- [4] Π. Β. Μαλατέστας, «Ηλεκτρική Κίνηση», 4^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
- [5] Π. Παπάζογλου, Σ. Π. Λιώνης, «Ανάπτυξη εφαρμογών με το Arduino», 1^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [6] Arduino Nano:
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- [7] A3967 Driver: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Motor-Driver-And-Interface-ICs/Bipolar-Stepper-Motor-Drivers/A3967.aspx>

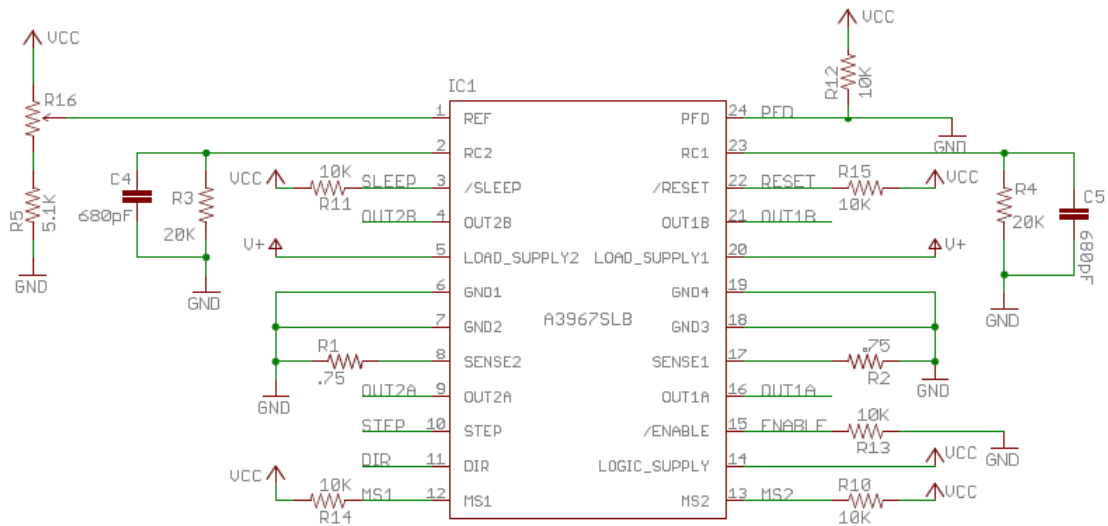
Παράρτημα Α - Ηλεκτρολογικά Σχέδια



Εικόνα 6 - Το σχέδιο της πλακέτας Arduino Nano.

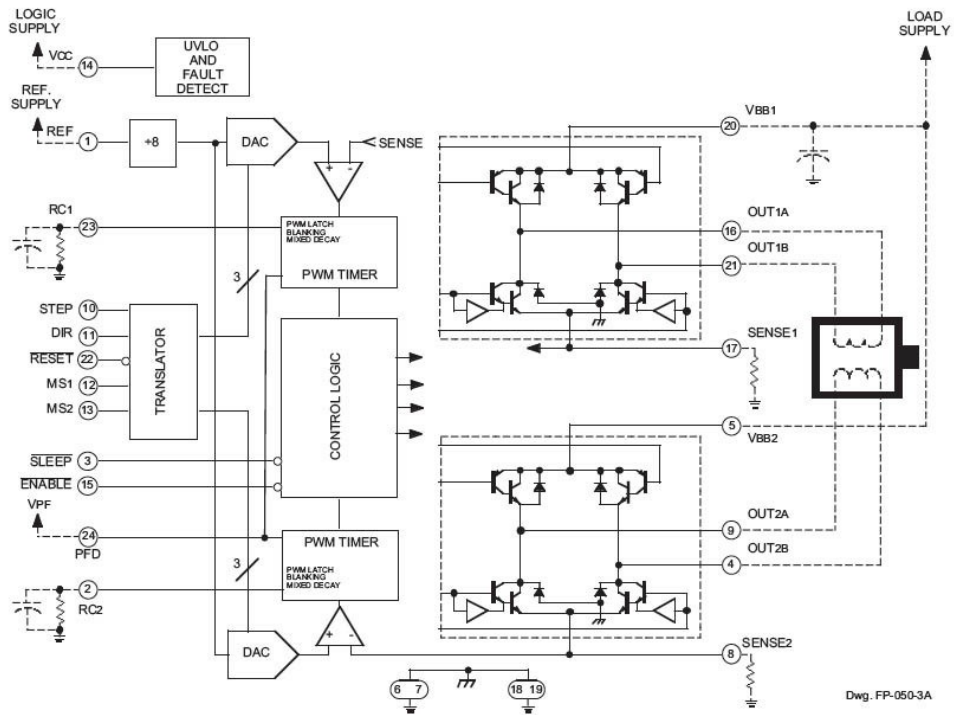


Εικόνα 7 - Το διάγραμμα των ακίδων σύνδεσης του Arduino Nano.

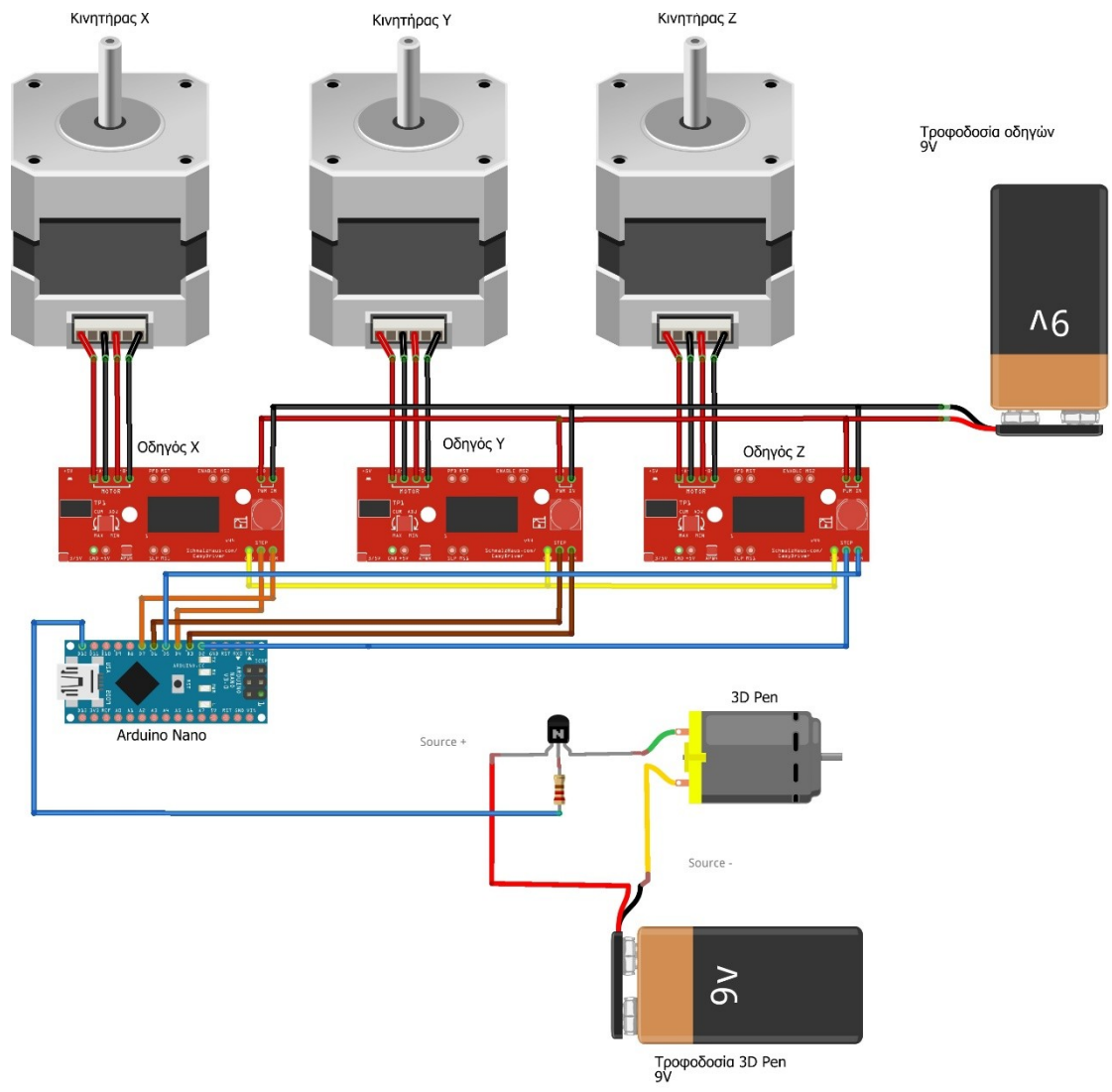


Εικόνα 8 - Το διάγραμμα των ακίδων σύνδεσης του οδηγού A2967SLB.

Functional Block Diagram



Εικόνα 9 - Το σχέδιο του ολοκληρωμένου κυκλώματος A2967SLB.



fritzing

Εικόνα 10 - Το σχέδιο της διάτρητης πλακέτας