

# ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (E-CAD)

## ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2022 – 2023

Χ. Βέργος – Καθηγητής

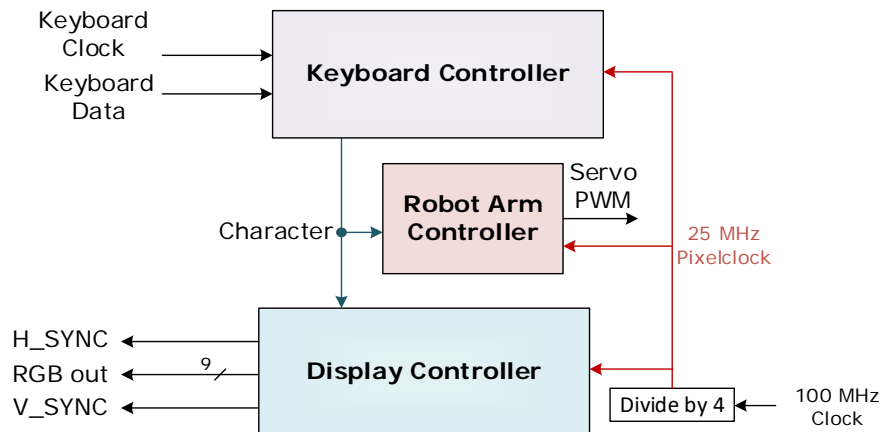
### ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

Σκοπός της φετινής εργασίας εξαμήνου είναι η σχεδίαση ενός Συστήματος Ανάγνωσης Πληκτρολογίου, Ελέγχου Ρομποτικού Βραχίονα και Απεικόνισης σε Οθόνη (ΣΑΠΕΡΒΑΟ).

#### Α. Γενική Αρχιτεκτονική του Συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια γενική εικόνα του στοχευόμενου συστήματος. Οι υποσχεδιασμοί που απαρτίζουν το σύστημα είναι:

- ♦ Ο Keyboard controller, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ανάγνωση συγκεκριμένων πλήκτρων από το πληκτρολόγιο. Αυτός ο πυρήνας έχει αναλυθεί και υλοποιηθεί στην εργαστηριακή άσκηση 8,
- ♦ Ο Robot Arm controller, ο οποίος ελέγχει τη θέση του ρομποτικού βραχίονα και
- ♦ Ο Display controller, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την απεικόνιση σε μία οθόνη μέσω VGA πρωτοκόλλου.



#### Β. Συνοπτική Περιγραφή της Λειτουργίας

Η λειτουργία του ΣΑΠΕΡΒΑΟ έγκειται στην ανάγνωση συγκεκριμένων πλήκτρων από το πληκτρολόγιο και στην κίνηση του ρομποτικού βραχίονα και στην απεικόνιση σε μια οθόνη VGA, ανάλογα με το αναγνωσθέν πλήκτρο. Θεωρήστε ότι ο keyboard controller δέχεται ως πιθανά πλήκτρα μόνο τα F, Q, H, X ενώ αγνοεί κάθε άλλο πλήκτρο. Ο πιο κάτω πίνακας παραθέτει το πως αυτά τα πλήκτρα καθορίζουν τη θέση του ρομποτικού βραχίονα.

Πλήκτρο	Σημασία	Θέση του ρομποτικού βραχίονα
F	F(oldded)	Πλήρως αναδιπλωμένος
Q	Q(quarterly) extended	Επεκταμένος κατά $\frac{1}{4}$
H	Half extended	Επεκταμένος κατά $\frac{1}{2}$
X	eXtended	Σε πλήρη επέκταση

Στην οθόνη, ο αναγνωσθείς χαρακτήρας εμφανίζεται πάντα στο κέντρο της, με άσπρο χρώμα και έχει μέγεθος 16x8 εικονοστοιχεία (pixels).

#### Γ. Υποσχεδιασμός Keyboard Controller

Όλη η απαραίτητη πληροφορία διασύνδεσης ενός πληκτρολογίου μέσω του PS/2 interface έχει αναπτυχθεί στην εργαστηριακή άσκηση 8. Τα scan codes που θα πρέπει να ανιχνεύετε στην παρούσα εργασία είναι τα :

Πλήκτρο	Scan Code (hex)
F	2B
Q	15
H	33
X	22

#### Δ. Απεικόνιση δεδομένων στην οθόνη VGA

Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν την απεικόνιση σε μια οθόνη VGA είναι ο ρυθμός ανανέωσης των καρτέ (Refresh Rate), ο αριθμός των οριζόντιων γραμμών από τις οποίες αποτελείται μια εικόνα (Number Of Rows) και ο αριθμός των pixels που περιλαμβάνει κάθε γραμμή (Number Of Pixels Per Row). Το γινόμενο των γραμμών και των pixels κάθε γραμμής καθορίζουν την ανάλυση της οθόνης. Η στοχευόμενη ανάλυση και ο ρυθμός ανανέωσης μας υποδεικνύουν τη συχνότητα λειτουργίας του ρολογιού της οθόνης,  $F_p$  (που πολλές φορές αναφέρεται ως ρολόι απεικόνισης ενός pixel, pixel clock), σύμφωνα με τη σχέση :

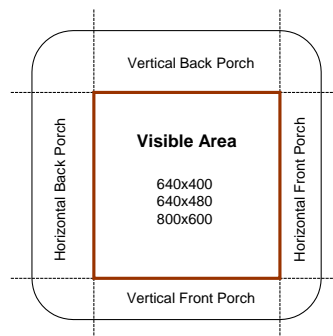
$$F_p = (\text{Refresh Rate}) \times (\text{Number Of Rows}) \times (\text{Number Of Pixels Per Row})$$

Προφανώς, για δεδομένη ανάλυση οθόνης, αύξηση του RefreshRate συνεπάγεται και την απαιτούμενη αύξηση της συχνότητας του pixel clock.

Ο επιθυμητός ελεγκτής απεικόνισης έχει τις αρμοδιότητες του χρονισμού της οθόνης και της αποστολής της προς απεικόνιση πληροφορίας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι δύο αυτές διαδικασίες αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.

##### Δ.1. Χρονισμός της οθόνης

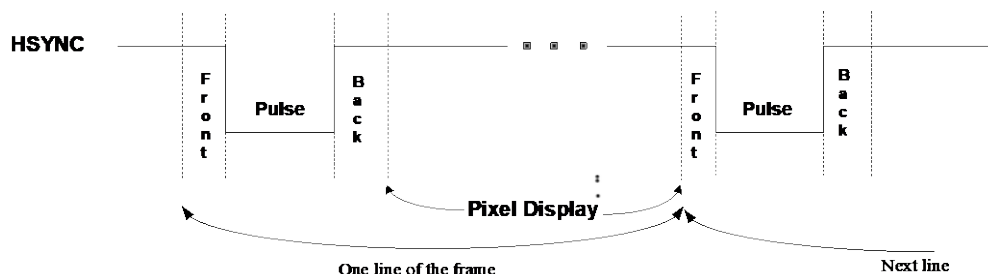
Ο χρονισμός της οθόνης, επιτυγχάνεται μέσω της οδήγησης από τον ελεγκτή, των σημάτων οριζοντίου (HSYNC) και κάθετου (VSYNC) συγχρονισμού. Το μεν πρώτο ενεργοποιείται κάθε φορά που κατά τη σάρωση ενός frame χρειάζεται να αλλάξουμε γραμμή ενώ το δεύτερο όταν έχει ολοκληρωθεί η προβολή ενός ολόκληρου καρτέ (frame). Για την ορθή λειτουργία της οθόνης απαιτείται η σάρωση κάποιων επιπλέον γραμμών (Vertical Porch) και pixels σε κάθε γραμμή (Horizontal Porch) διάστημα κατά το οποίο πραγματοποιείται αμαύρωση, απομάκρυνση δηλαδή του φορτίου από τα εικονοστοιχεία της οθόνης. Όταν γίνεται η σάρωση αυτών των επιπλέον γραμμών και pixels σε κάθε γραμμή δεν στέλνεται κάποια πληροφορία προς απεικόνιση **αλλά πρέπει η πληροφορία που αποστέλλεται να είναι το μαύρο χρώμα**. Στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται η οθόνη και οι αντίστοιχες περιοχές στις οποίες χωρίζεται. Η ορατή περιοχή φαίνεται στο κέντρο μαζί με κάποιες χαρακτηριστικές αναλύσεις.



Σημειώνεται πως η ανάλυση, π.χ., 640x400, αφορά μόνο την ορατή περιοχή ενώ στην πραγματικότητα τόσο το πλήθος των γραμμών κάθε frame όσο και τα pixels ανά γραμμή είναι περισσότερα. Οι γραμμές που περιέχονται στις περιοχές Vertical Front Porch και Vertical Back Porch δεν περιέχουν καμία πληροφορία όπως αντίστοιχα συμβαίνει και με τα pixels στις περιοχές Horizontal Back και Horizontal Front Porch.

##### Δ.1.1. Συγχρονισμός των γραμμών

Ο συγχρονισμός των γραμμών πραγματοποιείται με τη χρήση του σήματος HSYNC. Η ολοκλήρωση μιας περιόδου του σήματος αυτού συνεπάγεται την προβολή μιας γραμμής συμπεριλαμβανομένων και των περιοχών που δεν φέρουν πληροφορία δηλαδή των Horizontal Back Porch και Horizontal Front Porch. Μια περίοδος του σήματος HSYNC φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.

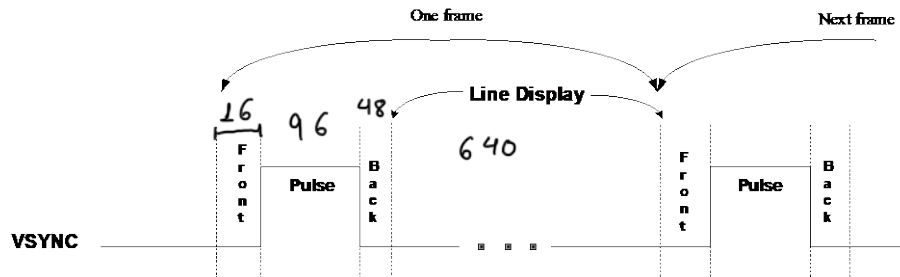


Ο χρόνος που διαρκεί κάθε περιοχή καθορίζεται από την ζητούμενη ανάλυση και το refresh rate και μετριέται συνήθως **σε πλήθος κύκλων ρολογιού (pixel clock cycles)**. Μια περίοδος του HSYNC είναι της τάξης των δεκάδων μsecond.

##### Δ.1.2. Συγχρονισμός των frames

Ο συγχρονισμός των frames πραγματοποιείται με τη χρήση του σήματος VSYNC. Η ολοκλήρωση μιας περιόδου του σήματος αυτού συνεπάγεται και προβολή ενός ολόκληρου frame, δηλαδή του συνόλου των γραμμών που το αποτελούν.

Στην περίοδο του VSYNC συμπεριλαμβάνονται και οι περιοχές που δεν φέρουν πληροφορία δηλαδή οι Vertical Back Porch και Front Porch, αντίστοιχα. Μια περίοδος του σήματος VSYNC φαίνεται στο σχήμα.



Αντίθετα με τον συγχρονισμό σε γραμμές, ο χρόνος που διαρκεί κάθε περιοχή σε μια περίοδο του σήματος VSYNC μετρείται συνήθως **σε πλήθος γραμμών** και μια περίοδος του VSYNC είναι της τάξης των δεκάδων msecond.

Για την εργασία σας, θα χρησιμοποιήσουμε μια ανάλυση 640x400 και refresh rate ίσο με 70Hz. Έτσι οι παράμετροι (οι περισσότερες εμπορικές οθόνες υποστηρίζουν μια ανοχή της τάξης του  $\pm 5\%$  ως προς το pixel clock) του στοχευόμενου συστήματος είναι οι εξής:

- ♦ Συχνότητα ρολογιού Pixel Clock = 25 MHz. Τη συχνότητα αυτή θα πρέπει να την παράξετε με ικανοποιητική ακρίβεια. Μπορείτε σχετικά να ανατρέξετε στην εργαστηριακή άσκηση 7.
- ♦ HorizontalFrontPorch = 16 pixels
- ♦ HSYNC Pulse = 96 pixels
- ♦ HorizontalBackPorch = 48 pixels
- ♦ VisiblePixels = 640 pixels
- ♦ VerticalFrontPorch = 12 rows
- ♦ VSYNC Pulse = 2 rows
- ♦ VerticalBackPorch = 35 rows
- ♦ VisibleRows = 400 rows

$$25 \text{ MHz} = 70 \text{ Hz} \cdot (640 + 16 + 48) \cdot (400 + 12 + 35)$$

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση, ο παλμός Pulse για το σήμα HSYNC είναι αρνητικής λογικής, ενώ για το VSYNC θετικής λογικής (δείτε και τα παραπάνω σχήματα). Γενικότερα όμως, η πολικότητα αυτών των σημάτων μαζί με τα χρονικά χαρακτηριστικά τους καθορίζουν την επιθυμητή ανάλυση της οθόνης.

#### 4.2. Απεικόνιση εικόνας

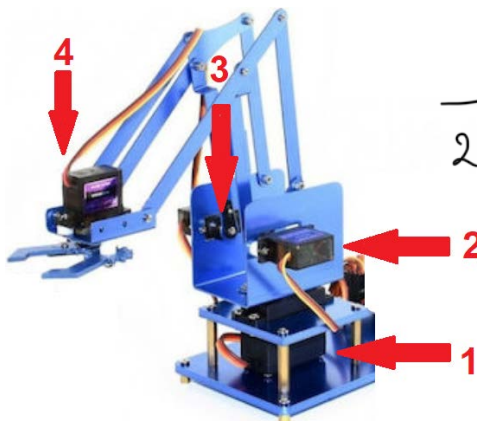
Κάθε εικόνα απεικονίζεται βάσει των pixel που την απαρτίζουν. Κάθε pixel μπορεί να είναι μαύρο, δηλαδή μη διαχωρίσιμο από το background ή να έχει μία από 512 διαφορετικές χρωματικές αποχρώσεις ανάλογα με την ένταση της κάθε χρωματικής συνιστώσας (R, G, B). Η πλακέτα μας διαθέτει τα σήματα RED [2:0], GREEN [2:0] και BLUE[2:0], τα οποία απεικονίζονται στους ακόλουθους ακροδέκτες του FPGA :

Σήμα	Ακροδέκτης του FPGA
VGA-RED2	B1
VGA-RED1	D6
VGA-RED0	C8
VGA-GREEN2	C3
VGA-GREEN1	A5
VGA-GREEN0	A8
VGA-BLUE2	D5
VGA-BLUE1	E7
VGA-BLUE0	C9
VGA-HSYNC#	B7
VGA-VSYNC#	D8

Στην παρούσα εργασία ζητείται ασπρόμαυρη εικόνα, πράγμα που σημαίνει ότι αρκεί τα pixels του απεικονιζόμενου χαρακτήρα να είναι λευκά και όλη η υπόλοιπη οθόνη χρώμα μαύρο. Συνεπώς θα πρέπει κάθε φορά που θέλετε να απεικονίσετε ένα λευκό pixel του χαρακτήρα να θέτετε RED [2:0] = GREEN [2:0] = BLUE[2:0] =  $111_2 = 7_{10}$  ενώ θα πρέπει να θέτετε όλες τις χρωματικές συνιστώσες στο 0 για κάθε άλλο pixel περιοχής απεικόνισης. Υπενθυμίζεται ότι κατά τη διάρκεια του χρόνου αμαύρωσης, όταν δηλαδή γίνεται η σάρωση των επιπλέον γραμμών και pixels σε κάθε γραμμή εκτός της περιοχής απεικόνισης **πρέπει η πληροφορία που αποστέλλεται να είναι το μαύρο χρώμα**.

## Ε. Υποσχεδιασμός Robot Arm Controller

Η θέση όπως και οι κινήσεις ενός ρομποτικού βραχίονα εξαρτώνται από servo motors (εν συντομία servos). Ο συγκεκριμένος ρομποτικός βραχίονας που θα χρησιμοποιήσουμε στην εργασία, διαθέτει 4 servos τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα :

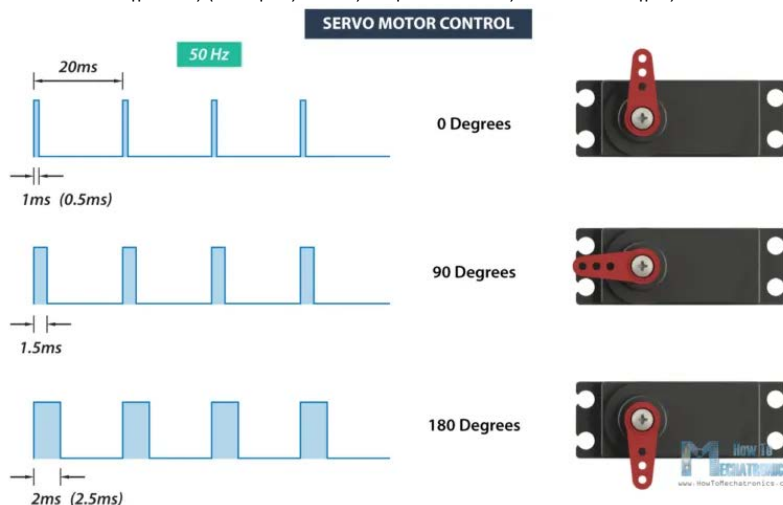


$$\frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{2} \cdot 10^2 = 50 \text{ Hz}$$

Το servo 1 ελέγχει την περιστροφή του ρομποτικού βραχίονα, το 2 την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα πάνω και κάτω, το 3 την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα μπροστά και πίσω και τέλος το 4 το άνοιγμα και κλείσιμο της δαγκάνας. Στην παρούσα εργασία ζητείται η ενασχόληση μόνο με το servo 3, αν και όσα περιγράφονται πιο κάτω ισχύουν και για τα υπόλοιπα και σχεδόν για όλα τα servos της αγοράς.

Κάθε servo ελέγχεται από ένα σήμα ρολογιού, με περίοδο 20ms, το **duty cycle** του οποίου καθορίζει τη θέση που θα κινήσει το servo τον βραχίονα. Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο duty cycle εννοούμε το ποσοστό του χρόνου κύκλου στο οποίο το σήμα είναι στο 1 σε κάθε περίοδο. Επειδή στην ουσία εμφωλεύουμε τη πληροφορία κίνησης στο εύρος του παλμού τα σήματα που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο των servos μπορούν να θεωρούνται ως PWM (Pulse Width Modulated) σήματα.

Το servo που ζητείται να ελέγχετε σε αυτή την εργασία απαιτεί PWM σήμα με περίοδο 20ms και αναγνωρίζει duty cycle 5 έως 10% (1ms – 2ms) για τις διάφορες ζητούμενες θέσεις. Δείτε την παρακάτω εικόνα με τις διάφορες θέσεις του servo ανάλογα με το duty cycle του PWM σήματος (οι τιμές εντός παρενθέσεως δεν υποστηρίζονται στο servo του εργαστηρίου):



Αν λοιπόν υποθέσουμε ότι όλα τα υποσυστήματα στην εργασία μας χρονίζονται με το Pixel Clock που πρέπει να είναι 25MHz σύμφωνα με τα προηγούμενα, μπορείτε εύκολα να υπολογίσετε ότι η περιόδός του παλμού σας (20ms) αντιστοιχεί σε 500.000 κύκλους του Pixel Clock, ενώ οι διάφορες θέσεις που ζητούνται στην εργασίας σας προκύπτουν ως εξής :

Πλήκτρο	Θέση του βραχίονα	Duty Cycle του PWM σήματος	Διαδοχικοί κύκλοι που το σήμα πρέπει να είναι 1
F	Πλήρως αναδιπλωμένος	5,00%	25.000
Q	Επεκταμένος κατά ¼	6,25%	31.250
H	Επεκταμένος κατά ½	7,50%	37.500
X	Σε πλήρη επέκταση	10,00%	50.000

Ο ακροδέκτης του FPGA στον οποίο απεικονίζεται το PWM σήμα είναι:

Σήμα	Ακροδέκτης του FPGA
PWM	M3

## ΣΤ. Βίντεο επίδειξης λειτουργίας

<https://youtu.be/P8hzgiHTz4k>

### Ζ.Βαθμολόγηση

- Η εργασία εξαμήνου θα μετρήσει ως το 65% του τελικού σας βαθμού. Το υπόλοιπο 35% της βαθμολόγησης θα προέλθει από τις εργαστηριακές ασκήσεις σας.
- Οι κανόνες βαθμολόγησης της εργασίας εξαμήνου είναι ως ακολούθως :
  - Συγχρονισμός της οθόνης : 30 μονάδες  
(οι οθόνες του εργαστηρίου υποδεικνύουν τον συγχρονισμό τους με ένα χαρακτηριστικό κλικ)
  - Απεικόνιση χαρακτήρων : 40 μονάδες
  - Έλεγχος βραχίονα : 30 μονάδες
  - Έξτρα μονάδες θα δοθούν για όσους θέλουν να παίξουν με χρώματα στην οθόνη, αντιστροφή εικόνας, κίνηση χαρακτήρα, έλεγχο επιπλέον servos του βραχίονα *(παρακαλώ μην κάνετε τις συνδέσεις μόνοι σας, καλέστε με να τις κάνουμε μαζί)* κλπ.