

Άσκηση 5: Προσομοίωση Αμφιβληστροειδούς

1 Εισαγωγή: Οργάνωση και λειτουργία αμφιβληστροειδούς

1.1 Δομή του αμφιβληστροειδούς και η λειτουργία της όρασης

Σε έναν φυσιολογικό αμφιβληστροειδή, τα φωτεινά ερεθίσματα γίνονται αντιληπτά μέσω ειδικών κυττάρων, των φωτοϋποδοχέων. Οι φωτοϋποδοχείς, διαθέτουν φωτοευαίσθητα μόρια και μετατρέπουν τα φωτεινά σήματα σε νευρικά δυναμικά, που μεταβιβάζονται σε άλλα κύτταρα του αμφιβληστροειδή, ξεκινώντας έτσι μια αλληλουχία νευρωνικής μεταβίβασης που καταλήγει στην μεταγωγή ερεθισμάτων στον εγκέφαλο. Έτσι, τα εγκεφαλικά ερεθίσματα δημιουργούν την αίσθηση της όρασης.

Στο Σχ. 1, απεικονίζεται η κυτταρική οργάνωση του αμφιβληστροειδή. Παρατηρούμε ότι στον άνθρωπο υπάρχουν δύο είδη φωτοϋποδοχέων, τα κωνία και τα ραβδία. Τα ραβδία είναι υπεύθυνα για την σκοτοπική όραση, δηλαδή την ασπρόμαυρη όραση σε χαμηλό φωτισμό. Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την αντίληψη του χρώματος και για αυτό τον σκοπό υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κωνίων, με ευαισθησία αιχμής σε διαφορετικά μήκη κύματος. Η ιδιότητα αυτή παρουσιάζεται στο Σχ. 2.

Τα υπόλοιπα κύτταρα του Σχ. 1, δηλαδή τα Horizontal Cells (HC), Bipolar Cells (BC), Amacrine Cells (AC), Ganglion Cells (GC), είναι νευρικά κύτταρα. Το δίκτυο των διασυνδέσεων των κυττάρων αυτών, είναι το βιολογικό υπόστρωμα των υπολογισμών που πραγματοποιούνται στον αμφιβληστροειδή.

Τελικά, τα γαγγλιακά κύτταρα μεταφέρουν την οπτική πληροφορία με την μορφή νευρωνικών spikes στο οπτικό νεύρο, προς τον εγκέφαλο. Το οπτικό νεύρο σχηματίζεται από τους νευράξονες των GCs, που συγκλίνουν σε κοινό σημείο και εξέρχονται σαν δέσμη από τον οφθαλμό.

Αξίζει να τονίσουμε, ότι στον αμφιβληστροειδή η πληροφορία κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση από το φως. Δηλαδή, η προσπίπτουσα στον αμφιβληστροειδή φωτεινή ακτινοβολία, διαπερνάει όλες τις στιβάδες του αμφιβληστροειδή, προκειμένου να φτάσει στην εσώτατη στοιβάδα που βρίσκονται οι φωτοϋποδοχείς. Αντίθετα, η πληροφορία μεταφέρεται από την εσώτατη στοιβάδα και τους φωτοϋποδοχείς, στην εξώτατη στοιβάδα και τα GCs.

1.2 Δυναμικά νευρικών κυττάρων

Ως απόκριση σε ερεθίσματα, δημιουργούνται δυναμικά στην μεμβράνη των κυττάρων που ταξινομούνται στις δύο επόμενες κατηγορίες:

1. **Βαθμωτά δυναμικά (Σχ. 3):** Το μέγεθος των βαθμωτών δυναμικών είναι ανάλογο του ερεθίσματος, δηλαδή ισχυρότερα ερεθίσματα προκαλούν μεγαλύτερα δυναμικά. Περιορίζονται τοπικά, επειδή εξασθενούν κατά την διάδοση.
2. **Δυναμικά δράσης (Σχ. 4):** Ένα δυναμικό δράσης δημιουργείται όταν το ερέθισμα ξεπεράσει ένα κατώφλι, ειδικό για κάθε κύτταρο. Όταν προκαλείται ένα δυναμικό δράσης, η μορφή του είναι πάντα ίδια, ανεξάρτητα από το μέγεθος του ερεθίσματος που το προκάλεσε. Διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις στο νευρικό σύστημα, χωρίς εξασθένηση.

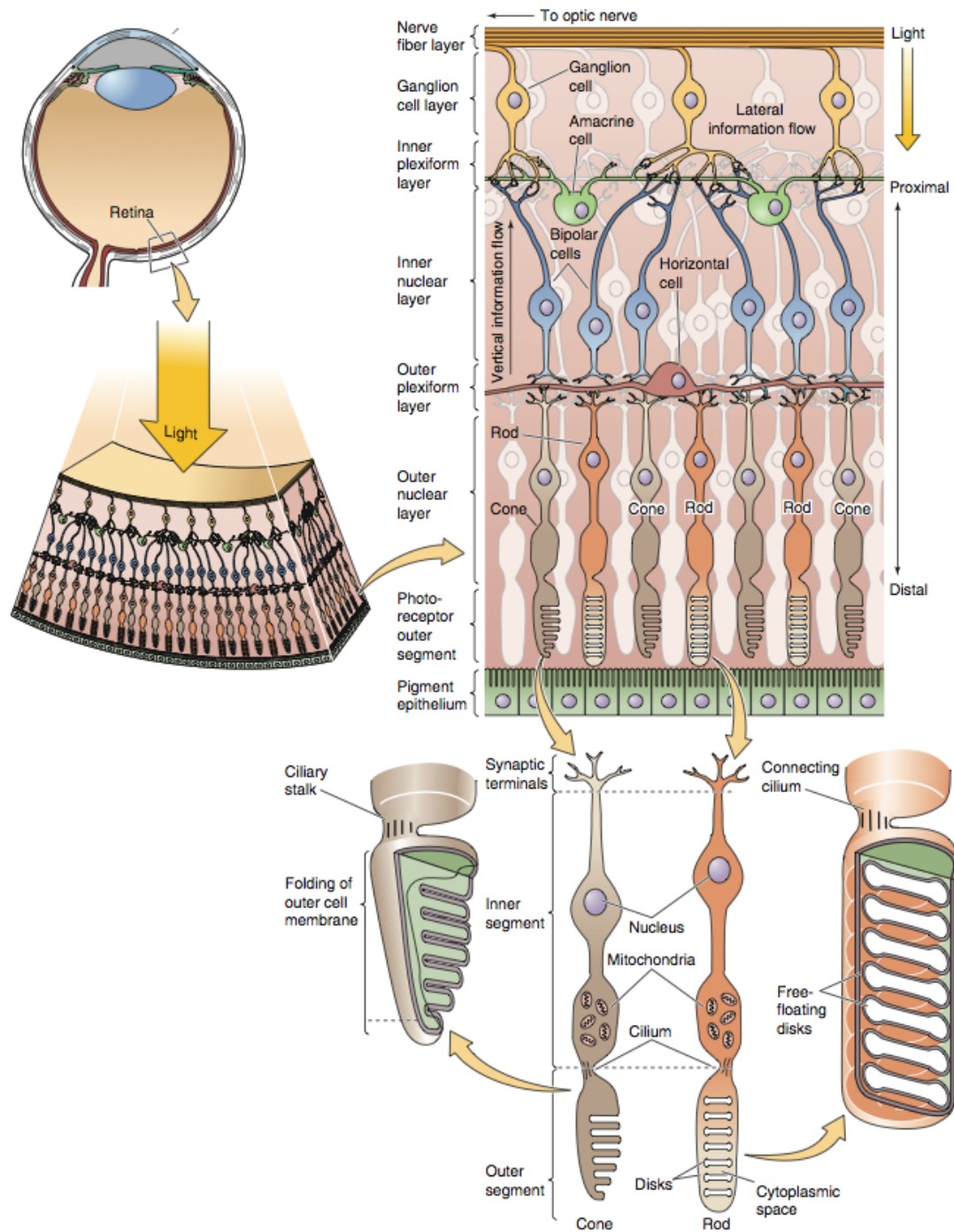
Η απόκριση ενός κυττάρου που παράγει δυναμικά ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχ. 5, μπορεί να παρασταθεί με μια ακολουθία αιχμών (spike train).

Στον αμφιβληστροειδή, δυναμικά δράσης παρατηρούνται στα GC και σε ορισμένους τύπους AC.

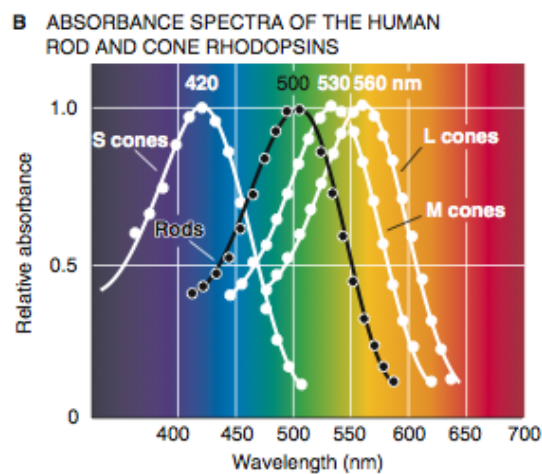
1.3 Σύνοψη κυττάρων αμφιβληστροειδούς και των λειτουργιών τους

Σε αυτή την ενότητα, συνοψίζονται τα είδη κυττάρων του αμφιβληστροειδούς (βλ. Ενότητα 1.1) και σχολιάζονται σύντομα οι λειτουργίες τους.

- Φωτοϋποδοχείς (PR): είναι τα φωτοευαίσθητα κύτταρα, αποκρίνονται δηλαδή σε φωτεινά ερεθίσματα
- Horizontal Cells (HC): Αντιλαμβάνονται την μέση φωτεινότητα σε μια περιοχή και συμβάλλουν ώστε η απόκριση του αμφιβληστροειδούς να μην επηρεάζεται από την μέση φωτεινότητα της σκηνής
- Bipolar Cells (BC): Συγκρίνουν την τοπική φωτεινότητα (σήμα από PR) με την μέση φωτεινότητα της περιοχής (σήμα από HC)
- Amacrine Cells (AC): εμφανίζουν μεγάλη ποικιλομορφία. Διαμορφώνουν την χρονική απόκριση του αμφιβληστροειδούς και τον συγχρονισμό της απόκρισης απομακρυσμένων GC
- Ganglion Cells (GC): Αποτελούν την έξοδο του αμφιβληστροειδή, που μεταφέρεται προς τον εγκέφαλο



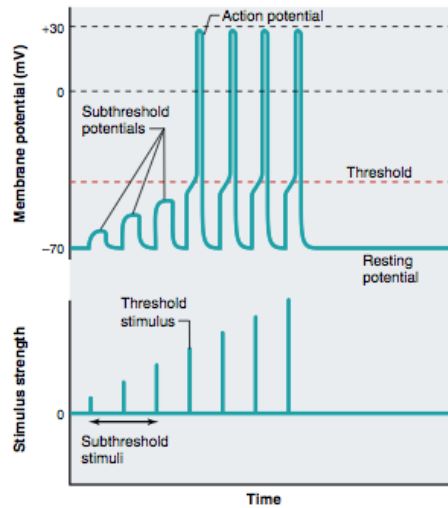
Σχήμα 1: Ο αμφιβληστροειδής-τα νευρωνικά κυκλώματα στον αμφιβληστροειδή των πρωτευόντων θηλαστικών. Παρατηρούμε ότι το εισερχόμενο φως προσπίπτει στους φωτοϋποδοχείς αφού διέλθει από πολλαπλές, διάφανες σιτάδες νευρικών κυττάρων. Το μελαγχρωματικό επιθήλιο απορροφά το φως που δεν απορροφήθηκε στους φωτοϋποδοχείς και ελαχιστοποιεί αντανάκλασεις του φωτός. Τα γαγγλιακά κύτταρα επικοινωνούν με τον θάλαμο στον εγκέφαλο με νευρικά δυναμικά που μεταφέρονται στους νευράξονές τους. Οι φωτοϋποδοχείς και τα υπόλοιπα κύτταρα του αμφιβληστροειδούς επικοινωνούν μεταξύ τους με βαθμωτά δυναμικά. Αναπαραγωγή από [2]



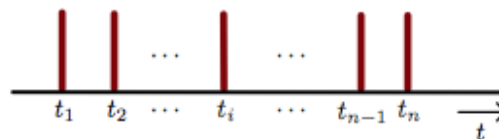
Σχήμα 2: Ευαισθησία των φωτοϋποδοχέων του ανθρώπου σε διαφορετικά μήκη κύματος φωτός. Η φωτοευαισθησία των ραβδίων, που είναι υπεύθυνα για την σκοτοπική όραση, έχει αιχμή στα 500 nm. Τα κωνία είναι υπεύθυνα για την φωτοπική, έγχρωμη, όραση. Οι αιχμές των τριών ειδών κωνίων βρίσκονται στα 420 nm για τα S (μπλε) κωνία, στα 530 nm για τα M (πράσινα) κωνία και στα 560 nm για τα L (κόκκινα) κωνία. Αναπαραγωγή από [2]



Σχήμα 3: Βαθμωτά δυναμικά. Ισχυρότερα ερεθίσματα προκαλούν μεγαλύτερα δυναμικά. Αναπαραγωγή από [1]



Σχήμα 4: Δυναμικά ενέργειας. Εκλύονται μόνο όταν το ερέθισμα υπερβεί ένα κατώφλι. Έχουν πάντα την ίδια μορφή, ανεξάρτητα από το μέγεθος του ερεθίσματος που τα προκάλεσε. Αναπαραγωγή από [1]

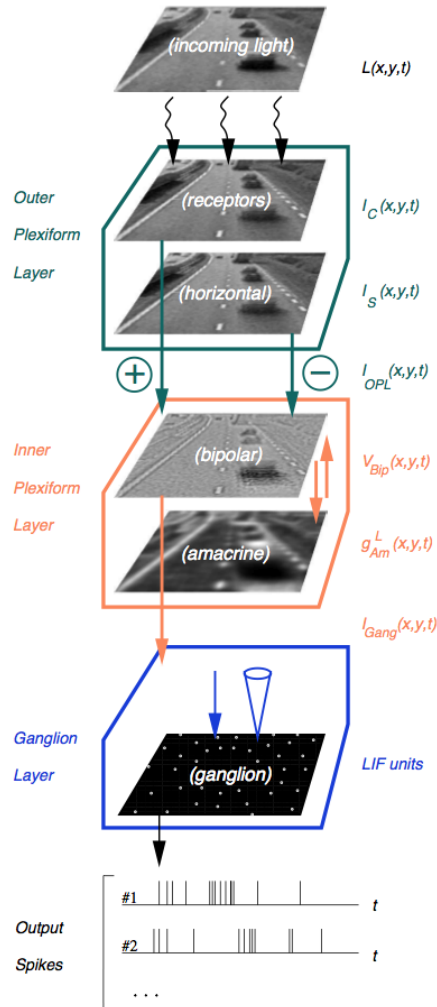


Σχήμα 5: Spike trains: κάθε αιχμή συμβολίζει ένα δυναμικό ενέργειας. Αναπαραγωγή από [3]

2 Προσομοίωση αμφιβληστροειδούς

Σε αυτή την Ενότητα αναλύονται ο προσομοιωτής Virtual Retina [5]. Αρχικά παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του (Ενότητα 2.1) και (Ενότητα 2.2) ακολουθεί το πρακτικό μέρος της Άσκησης.

2.1 Θεωρητική παρουσίαση προσομοιωτή Virtual Retina



Σχήμα 6: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου Virtual Retina. Στην αριστερή πλευρά, σημειώνονται τα αντίστοιχα βιολογικά στάδια. Κάθε στάδιο, με εξαίρεση το τελευταίο (GC), παράγει ένα χωρικά συνεχές σήμα, με διαστάσεις ίσες με αυτές της εισόδου L . Από [5]

Τα βασικά στάδια του προσομοιωτή παρουσιάζονται στο Σχ. 6. Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου, εξετάστε το σε αντιπαραβολή με την οργάνωση του αμφιβληστροειδούς που δίνεται στο Σχ. 1. Η έξω δικτυωτή στιβάδα (Outer Plexiform

layer-OPL), περιέχει τις συναπτικές συνδέσεις μεταξύ των PR και των τοπικών νευρώνων. Αντίστοιχα, η έσω δικτυωτή στιβάδα (Inner Plexiform Layer-IPL), περιέχει τις συναπτικές συνδέσεις μεταξύ των GC και των τοπικών νευρώνων.

Στον αμφιβληστροειδούς, πρέπει να μοντελοποιήσουμε τόσο τις χωρικές (spatial) σχέσεις, δηλαδή την εξάρτηση της απόκρισης ενός GC από την περιοχή που εντοπίζεται, όσο και τις χρονικές (temporal) σχέσεις, δηλαδή την χρονική εξέλιξη της απόκρισης ενός GC και την εξάρτηση της απόκρισης από προηγούμενες χρονικές στιγμές.

Για την μοντελοποίηση των χωρικών σχέσεων, χρησιμοποιούνται φίλτρα Γκαουσιανών συναρτήσεων. Τα Γκαουσιανά φίλτρα προσδιορίζονται πλήρως από την τυπική απόκλιση τους, σ . Όσο αυξάνεται το σ , αυξάνεται η περιοχή στην οποία εκτείνεται το Γκαουσιανό φίλτρο.

Αντίστοιχα, για την μοντελοποίηση των χρονικών σχέσεων, χρησιμοποιούνται εκθετικά φίλτρα, που προσδιορίζονται πλήρως από την σταθερά χρόνου τ . Τελικά, το χρονικό και χωρικό φιλτράρισμα που περιγράψαμε έχει την μορφή:

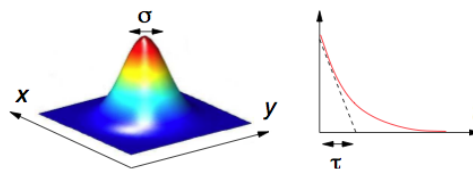
$$G_{\sigma}(x, y) \cdot \frac{\exp(-t/\tau)}{\tau}$$

Η περιγραφή των φίλτρων συμπληρώνεται με το Σχ. 7, στο οποίο δίνεται η γραφική παράσταση των χωρικών και χρονικών φίλτρων.

Ακόμα, για να εκφραστούν σχέσεις χρονικής εξάρτησης, χρησιμοποιούνται στον προσομοιωτή διαφορικές εξισώσεις (ΔΕ) πρώτης τάξης. Οι ΔΕ μπορεί να έχουν σταθερούς συντελεστές, ή μεταβαλλόμενους ως συνάρτηση άλλων παραμέτρων και εισόδων του προσομοιωτή.

Εξετάζοντας πάλι τον προσομοιωτή του Σχ. 6, έχουμε για κάθε στάδιο επεξεργασίας:

- Αρχικά, στο OPL πραγματοποιείται φιλτράρισμα της εικόνας εισόδου. Το στάδιο έχει center-surround οργάνωση, δηλαδή λαμβάνεται η διαφορά δύο Γκαουσιανών, μιας χωρικά ευρείας (surround) και μιας χωρικά περιορισμένης (center)
- Στο IPL, υπάρχουν δύο διακριτές συνιστώσες. Για το σήμα των κυττάρων AC, εφαρμόζεται ξανά φιλτράρισμα με Γκαουσιανά χωρικά και εκθετικά χρονικά φίλτρα. Για το σήμα των κυττάρων BC, χρησιμοποιείται ΔΕ, με συντελεστές



Σχήμα 7: Γκαουσιανή συνάρτηση με τυπική απόκλιση σ (αριστερά) και εκθετική συνάρτηση με σταθερά τ (δεξιά). Οι συναρτήσεις χρησιμοποιούνται για το χωρικό και χρονικό φιλτράρισμα αντίστοιχα. Από [5]

που μεταβάλλονται χρονικά, ως συνάρτηση του σήματος AC. Επομένως σε αυτό το στάδιο εφαρμόζεται ανάδραση

- Τέλος, στο στάδιο GC, χρησιμοποιείται ΔΕ με σταθερούς συντελεστές και παράγονται τα τελικά spikes

2.2 Πρακτικό μέρος

Ο προσομοιωτής Virtual Retina μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την γραμμή εντολών, για την προσομοίωση της απόκρισης του αμφιβληστροειδούς σε δοσμένη ακολουθία εικόνων. Για την χρήση του, είναι απαραίτητη η περιγραφή των παραμέτρων του αμφιβληστροειδούς, που συγκεντρώνονται σε κατάλληλο αρχείο XML.

2.2.1 Παράμετροι μοντέλου αμφιβληστροειδούς

1. Παρατηρήστε τα γενικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, που ορίζονται πρώτα στο αρχείο XML. Πώς αντιστοιχίζονται μεγέθη της εικόνας, η οποία απαρτίζεται από pixels, σε μεγέθη ειδώλων στον αμφιβληστροειδή, που περιγράφονται με την οπτική γωνία (visual angle). Δώστε την σχετική παράμετρο και εξηγήστε σύντομα την έννοια της οπτικής γωνίας
2. Με ποιά σύνταξη ορίζονται τα στάδια (layers) του αμφιβληστροειδή; Ονομάστε τα layers που αναγνωρίζετε, αφού συμβουλευτείτε τις προηγούμενες ενότητες.
3. Πώς μπορείτε να εντοπίσετε παραμέτρους που περιγράφουν χωρικά (Γκαουσιανά) και χρονικά (εκθετικά) φίλτρα; Δώστε τις παραμέτρους που αναγνωρίζετε και αναφέρετε το layer που βρίσκεται κάθε φίλτρο. Για τα χωρικά φίλτρα, δώστε το μέγεθος των Γκαουσιανών σε pixels.
4. Μπορείτε να εντοπίσετε λειτουργίες του μοντέλου αμφιβληστροειδούς που δεν εξηγήθηκαν στην απλοποιημένη, συνοπτική παρουσίαση του προσομοιωτή; Δώστε παραδείγματα.

2.2.2 Δεδομένα προσομοίωσης

Στην συνέχεια, επεξεργαζόμαστε δεδομένα που παράγονται από το μοντέλο του αμφιβληστροειδούς. Στα δεδομένα που δίνονται, εξερευνήστε την δομή (struct) Data και τα πεδία αυτής.

1. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, ποιος είναι ο αριθμός των κυττάρων που παράγουν την έξοδο του μοντέλου; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
2. Ποιά μορφή έχει η έξοδος του αμφιβληστροειδή; Τι συμπεραίνουμε για τον τύπο των κυττάρων εξόδου του μοντέλου; Αναφέρετε το πεδίο (field) όπου αποθηκεύεται η έξοδος του μοντέλου.

3. Σε ποιο πεδίο αποθηκεύεται η ακολουθία που διεγείρει τον αμφιβληστροειδή; Ποσά καρέ αποτελούν την ακολουθία εισόδου; Τι απεικονίζεται σε αυτήν; Ζητούνται ο κώδικας για την επισκόπηση της ακολουθίας εισόδου και χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ακολουθίας εικόνων. Σχετικές συναρτήσεις: `imshow`, `imshow`
4. Κάθε κύτταρο του μοντέλου, διεγείρεται από μια συγκεκριμένη υποπεριοχή της εικόνας (Receptive Field-RF). Εξηγήστε πως μπορούμε να βρούμε το RF κάθε κυττάρου του μοντέλου. Επιλέξτε ένα κύτταρο και παρουσιάστε το RF του. Ζητούνται ο κώδικας για την επισκόπηση της ακολουθίας εισόδου και χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ακολουθίας εικόνων. Σχετικές συναρτήσεις: `imshow`, `imshow`
5. Πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τις θέσεις των κυττάρων στην εικόνα εισόδου; Τι σχήμα έχει το πλέγμα στο οποίο διατάσσονται τα κύτταρα; Ζητείται ο κώδικας για την παρουσίαση των θέσεων των κυττάρων. Σχετικές συναρτήσεις: `imshow`, `scatter`

Αναφορές

- [1] J Arthur, Dorothy-Sherman Luciano, et al. *Human physiology. The mechanisms of body function*. Boston, MA: McGraw-Hil Higher Education, 2001, 8th edition, 2001. 4, 5
- [2] Walter F Boron and Emile L Boulpaep. *Medical Physiology, 1e Updated Edition E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2004. 3, 4
- [3] Leonel Augusto Sousa et al. *Bioelectronic vision: retina models, evaluation metrics, and system design*, volume 3. World Scientific, 2009. 5
- [4] Adrien Wohrer. *Virtual retina - tutorial*, 2010.
- [5] Adrien Wohrer and Pierre Kornprobst. Virtual retina: a biological retina model and simulator, with contrast gain control. *Journal of computational neuroscience*, 26(2):219--249, 2009. 6, 7