

Η χαοτική δυναμική στην Ιατρική

Το κύριο ίσως χαρακτηριστικό ενός οποιουδήποτε υγιούς βιολογικού ιστού είναι η ικανότητα άνετης αυτοπροσαρμογής σε απότομα και απροσδόκητα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Δεν είναι τυχαίο ότι πλείστοι βιολογικοί ιστοί είναι δομικά μεν fractals, λειτουργικά δε χαοτικοί παράξενοι ελκυστές.

Αλλά τι είναι χάος και fractals;

Καταρχήν, η χαοτική δυναμική αφορά αποκλειστικώς και μόνο μη γραμμικά δυναμικά συστήματα, συστήματα δηλαδή όπου καθ' έκαστα μεταβλητές συνδέονται όχι προσθετικά αλλά πολλαπλασιαστικά και οι καθ' έκαστα λύσεις των συστημάτων αυτών δεν είναι γραμμικά υπερθέσιμες, αλλά μάλλον συμπληρωματικές και αμοιβαία αποκλειόμενες.

Δεύτερον, τα χαοτικά συστήματα, ενώ είναι εν γένει ολιγοδιάστατα και πλήρως ντετερμινιστικά, είναι και απρόβλεπτα από πλευράς μακράς χρονικής εξέλιξεως, λόγω ευαίσθητης εξάρτησης της πορείας τους από τις αρχικές συνθήκες «εκκινήσεως». Τούτο σημαίνει ότι μικροδιακυμάνσεις στις αρχικές συνθήκες πολλαπλασιάζονται στο χρόνο κατά μέσο όρο εκθετικά, έτσι ώστε δύο «τροχιές» του συγκεκριμένου συστήματος που εκκινούν με μικροδιαφορές στις αρχικές συνθήκες να αποκλίνουν τάχιστα.

Αν όμως υπάρχουν κατευθύνσεις κατά τις οποίες αρχικά γειτονικές τροχιές αποκλίνουν εκθετικά, υπάρχουν σε κάθε χαοτικό σύστημα και κατευθύνσεις κατά τις οποίες αρχικά απομακρυσμένες τροχιές συγκλίνουν εκθετικά.

Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι το σύστημα δειγματοληπτεί, ούτως ειπείν, το χώρο των καταστάσεων στον οποίο εξελίσσεται μέσω των δυναμικών «ψευδοποδίων» του, δηλαδή των τροχιών του, τότε αντιλαμβανόμεθα ότι κατά τις κατευθύνσεις των αποκλινουσών τροχιών ο χώρος των καταστάσεων δειγματοληπτείται όλο και πιο αραιά· έτσι, αρχικές αβεβαιότητες αυξάνονται, με αποτέλεσμα το χαοτικό μας σύστημα να δρα ουσιαστικά κατά τις κατευθύνσεις αυτές ως πηγή εντροπίας, ενώ κατά τις κατευθύνσεις των συγκλινουσών τροχιών αρχικές αβεβαιότητες «συμπιέζονται» προοδευτικά ώστε να κάνουν το σύστημά μας να δρα ως πηγή πληροφορίας.

Διά την κατηγορία των «διατηρητικών» χαοτικών συστημάτων, οι διαγραφόμενοι «όγκοι» στο χώρο των καταστάσεων παραμένουν σταθεροί κατά την εξέλιξη του συστήματος, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας εξισορροπείται ακριβώς από το ρυθμό παρα-

γωγής πληροφορίας. Διά την πολύ ενδιαφέρουσα όμως κατηγορία των μη διατηρητικών χαοτικών συστημάτων —που έχουν και το πρακτικό ενδιαφέρον— οι όγκοι στο χώρο των καταστάσεων συρρικνώνονται προοδευτικά με ασυμπτωτική τιμή το μηδέν, που σημαίνει ότι ο μέσος ρυθμός παραγωγής πληροφορίας είναι μεγαλύτερος από το μέσο ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

Ιδεώδη μοντέλα

Τα συστήματα αυτά έχουν, λοιπόν, το χαρακτηριστικό της ασυμπτωτικής ευστάθειας και μάλιστα σε πολλαπλό βαθμό: έχουν, δηλαδή, την ιδιότητα, εξελισσόμενα από διαφορετικά υποσύνολα αρχικών συνθηκών, να καταλήγουν σε συνυπάρχοντες πολλαπλούς ελκυστές (attractors), καθένας των οποίων δρα όπως ειπείν σαν αφαίρεση ή abstraction, σαν «συμπιεστής» ή σαν «γνωστική ρουφήχτρα», αν θέλετε, ενός πεπερασμένου υποσυνόλου αρχικών συνθηκών που λέγεται «κοίτη έλξης». Οι συνυπάρχοντες, λοιπόν, ελκυστές ενός τέτοιου μη διατηρητικού χαοτικού συστήματος μπορούν να παίξουν το ρόλο συνεπτηγμένων κατηγοριών ή μνημών, στις οποίες το υπό εξομοίωση γνωστικό σύστημα διαμερίζεται ένα αρχικά αδιαφοροποίητο σύνολο αρχικών συνθηκών ή εξωτερικών ερεθισμάτων.

Η ιδιότητα αυτή καθιστά τα μη διατηρητικά χαοτικά συστήματα ιδεώδη μοντέλα (πρότυπα) βιολογικών επεξεργαστών πληροφορίας, τοσούτον μάλλον καθ' όσον η συνύπαρξη «θορύβου» και τάξεως σε ένα χαοτικό ελκυστή συνάδει προς τη φύση μιας βιολογικής μνήμης, η οποία, μακράν του να είναι «στατική» ή περιοδικώς επαναλαμβανόμενη, ενέχει στοιχεία αντοσχεδιασμού και εξελίξεως. Η τοπολογία των χαοτικών ελκυστών είναι fractal (μορφολογισματική). Μια fractal δομή χαρακτηρίζεται (κατ' αντιδιαστολή προς τα ευκλείδεια γεωμετρικά σχήματα) από αναλλοίωτες ιδιότητες σε αλλαγή κλίμακας και από κλασματικούς βαθμούς ελευθερίας.

Δεν είναι ίσως τυχαίο ότι πλείστοι βιολογικοί ιστοί (το βρογχοπνευμονικό δένδρο, ο προστάτης, ο εγκεφαλικός φλοιός, ο νεφρός, το εσωτερικό τοίχωμα του λεπτού εντέρου, το κυκλοφορικό σύστημα των αρτηριών και φλεβών κ.λπ. καθώς και όλες οι πρωτεΐνες) έχουν fractal δομή, είναι δε αξιοσημείωτο ότι, όταν μια fractal (αυτοόμοια σε μετασχηματισμούς κλίμακας) δομή διεγερθεί από ένα παλμικό ερέθισμα, παρουσιάζει μη διατηρητική χαοτική λειτουργία με απλούς ή πολλαπλούς συνυπάρχοντες ελκυστές.

Τέσσερα πλεονεκτήματα

Η χαοτική δομή εξασφαλίζει σε ένα βιολογικό ιστό τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1) Σε πολύ μικρούς όγκους εμπεριέχονται τεράστιες επιφάνειες (π.χ. ο βρογχοπνευμονικός ιστός του ανθρώπου καταλαμβάνει όγκο μόνο ~ 0.1 lt αλλά, αν η επιφάνειά του απλωθεί σε μια στρώση πάχους μιας κυτταρικής διαμέτρου, καταλαμβάνει την έκταση περπίου... ενός γηπέδου τένις).

Ας σκεφτούμε τι θα συνέβαινε αν οι βιολογικοί ιστοί ήσαν «ευκλείδεια στερεά»: τότε

ένα βιολογικό ον διπλάσιου, επί παραδείγματι, ύψους θα είχε τετραπλάσια επιφάνεια αλλά και οκταπλάσιο βάρος. Αντιλαμβάνεται κανείς αμέσως ότι, πέραν ενός ορίου, ένας τέτοιος οργανισμός θα κατέρρεε υπό το ίδιο του βάρος.

Η fractal δομή αντιπαρέχεται ένα τέτοιο ενδεχόμενο δημιουργώντας δομές που στον τρισδιάστατο, π.χ., καρτεσιανό χώρο έχουν διαστατικότητα μεταξύ 2 και 3, δηλαδή μεταξύ μιας ευκλείδειας επιφάνειας και ενός ευκλείδειου όγκου.

2) Σε ένα σύνηθες ευκλείδειο στερεό ή επιφάνεια, ο «βαθμός διαχυτότητας» μιας ουσίας υπό την επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων (θορύβου) είναι ευθέως ανάλογος του χρόνου t . Αποδεικνύεται ότι σε fractal δομές ο βαθμός διαχυτότητας αυξάνεται ταχύτερα ως δύναμη του t^v ($v > 1$). Έτσι, π.χ. στους πνεύμονες ή στον προστάτη, η fractal δομή επιτρέπει ταχύτερη και αποτελεσματικότερη μίξη αερίων και υγρών αντίστοιχα. (Το φαινόμενο αυτό καλείται «υπερ-διάχυση».)

3) Μια fractal δομή είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε μικρό χρόνο από έναν απλό αλγόριθμο, ο οποίος επαναλαμβάνει εαυτόν σε πολλές κλίμακες ταυτοχρόνως χωρίς ουσιαστικές αλλαγές. Έτσι ο γεννητικός αλγόριθμος εν προκειμένω χρειάζεται για την κατασκευή ενός βιολογικού ιστού πολύ μικρότερο χρόνο απ' αυτόν που θα απαιτούσε η κατασκευή ενός «συμπαγούς» ευκλείδειου ιστού.

4) Ακριβώς επειδή μια fractal δομή εμπεριέχει πολλαπλές κλίμακες, επιτρέπει βραδεία αύξηση του λεγόμενου «μορφογεννητικού σφάλματος», δηλαδή του μοιραίου σφάλματος (λόγω μεταλλαγών) ανακατασκευής από γενεάς εις γενεάν ενός συγκεκριμένου ιστού.

Στην περιοχή της καρδιολογίας

Μια διαταραχή λόγω μεταλλαγών θα ισοδυναμούσε πρακτικά με την παρασιτική εισαγωγή μιας νέας κλίμακας. Αν όμως στην υπό κατασκευή fractal δομή η κλίμακα αυτή προϋπάρχει, τότε η εξωτερική διαταραχή «παραβιάζει» ούτως ειπείν «ανοικτές θύρες». Αυτό σημαίνει ότι μια fractal δομή παρουσιάζει μεγάλη αναισθησία σε τυχαίες διαταραχές — συγκεκριμένα το μορφογεννητικό σφάλμα αυξάνεται λογαριθμικά με τη μέση απόκλιση της διαταραχής, ενώ για μια μη fractal δομή θα αυξανόταν εκθετικά. Μια εντυπωσιακή βιολογική εφαρμογή της χαοτικής δυναμικής εντοπίζεται στην περιοχή της κλινικής καρδιολογίας. Μέχρι και προ πέντε περίπου ετών επιστεύετο ότι η «υγιής» καρδιά παρουσιάζει αυστηρή περιοδικότητα, δηλαδή η ασυμπτωτικά ευσταθής δυναμική της είναι ένας «οριακός κύκλος». Πρόσφατες κλινικές και επιδημιολογικές σπουδές ανατρέπουν άρδην την (εύλογη!) αυτή άποψη. Ο δρ Any Goldberger στην καρδιολογική κλινική του Harvard άρχισε προ πενταετίας μια συστηματική φασματική ανάλυση του QRS ρυθμού (που καταγράφεται σε εξετάσεις ρουτίνας από τον κοινό ηλεκτροκαρδιογράφο) του κοιλιακού μυοκαρδίου. Βρήκε ότι σε υγιή άτομα το φάσμα αυτό σε διπλή λογαριθμική κλίμακα για μια συνεχή περιοχή συχνοτήτων $\sim 0.3 \text{ Hz} - 100 \text{ Hz}$ είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση -1 (αυτό που ονομάζουμε « $1/f$ θόρυβος»), αλλά σε άτομα επιδεκτικά σε ανατάξιμη ή μη ανατάξιμη κοιλιακή μαργαρυγή (ventricular fibrillation) το φάσμα αυτό συρρικνώνεται σημαντικά (η κλίση γίνεται -1.5 , -2 , $-3,0\dots$), έτσι ώστε οι υψηλές συχνότητες να αποκόπτονται. Τι σημαίνει αυτό;

Σημαίνει ότι η λειτουργία του υγιούς κοιλιακού μυοκαρδίου οφείλει να είναι εν τίνι μέτρω «θορυβώδης», ώστε να καθιστά το άτομο ικανό να προσαρμόζεται σε ερεθίσματα (συγκινήσεις, μυική καταπόνηση) που απαιτούν μικρό χρόνο χαλάρωσης (δηλαδή υψηλές συχνότητες). Η ασυμπτωτική ευσταθής τροχιά (ο ελκυστής) μιας τέτοιας χρονοσειράς QRS με φάσμα «1/f-noise» δεν είναι οριακός κύκλος (πράγμα που θα έδιδε ένα διακριτό φάσμα συχνοτήτων), αλλά ένας χαοτικός ελκυστής με «διαστατικότητα» της τάξεως του $\sim 5,2$ (και όχι 1, όπως θα συνέβαινε αν ο ελκυστής ήταν οριακός κύκλος).

Ας σημειωθεί ότι αυτή η χαοτική λειτουργική συμπεριφορά του (υγιούς) κοιλιακού μυοκαρδίου είναι απότοκος της fractal δομής ενός (αυτοόμοιου) δενδριτικού σχηματισμού κυτταρικών αξόνων του μυοκαρδίου (του His-Purkinje σχηματισμού), μέσω του οποίου ο παλμός του κατώτερου καρδιακού βηματοδότη (του κόμβου AV) μεταβιβάζεται στο κοιλιακό μυοκάρδιο. Τυχόν τοπολογική παραμόρφωση του παραπάνω δενδριτικού σχηματισμού (οφειλόμενη σε παθολογικά αίτια) τροποποιεί άρδην (και επί τα χείρω) το λειτουργικό φάσμα του υγιούς μυοκαρδίου, δηλαδή το «στενεύει», με αποτέλεσμα ο κάτοχός του να αδυνατεί να αντεπεξέλθει σε ξαφνικά ερεθίσματα που, όπως είπαμε, απαιτούν μικρούς χρόνους χαλάρωσης.

Η εφαρμογή στον εγκέφαλο

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί μια εφαρμογή των χαοτικών συστημάτων με πολλαπλούς ελκυστές (κατηγορίες-μνήμες) στη δυναμική του εγκεφαλικού φλοιού: η δυναμική αυτή πειραματικά ελέγχεται με το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, που είναι (όπως και το ηλεκτροκαρδιογράφημα) η καταγραφή μιας μονοδιάστατης προβολής (χρονοσειράς) μιας πολυδιάστατης δυναμικής διαδικασίας.

Στο προκειμένο, οι διάφορες μνήμες-κατηγορίες-ελκυστές στον εγκεφαλικό φλοιό έχουν ως hardware —«υλική υποδομή»— υποσύνολα νευρωνικών δικτύων.

Ένας νευροφυσιολογικός «βηματοδότης» —βρόγχος ανάδρασης—, του οποίου η δυναμική εκπηγάζει από ειδικά νευρωνικά κέντρα του θαλάμου (the «thalamocortical» pacemaker), που εξικνείται μέχρι των νευρωνικών δικτύων του φλοιού και επιστρέφει στο θάλαμο, είναι υπεύθυνος για την εκ περιτροπής στο χρόνο «αναζωπύρωση» των καθ' ἑκαστα συνυπαρχουσών μνημών-κατηγοριών-χαοτικών ελκυστών.

Κατά τη διάρκεια συμπεριφερικών καθεστώτων, όπως, π.χ., η κατάσταση χαλάρωσης (relaxation) και ο ελαφρός ύπνος, η δυναμική του παραπάνω βηματοδότη είναι και αυτή ένας χαοτικός ελκυστής σχετικά μικρής διαστατικότητας ($\sim 3-4$) και η διαλειπτική διαδικασία μεταπτώσεώς του από τη μια μνήμη στην άλλη είναι σχετικά ομοιογενής (δηλαδή, περίπου ίσος χρόνος «προσοχής» εκχωρείται σε καθεμιά από τις συνυπάρχουσες μνήμες).

Κατά τη διάρκεια, όμως, ενεργού συμμετοχής του ατόμου σε επίλυση προβλημάτων ή αναγνωρίσεως προτύπων, ο νευροφυσιολογικός βηματοδότης καθίσταται χαρακτηριστικά ανομοιογενής: ο χρόνος που διατίθεται για καθεμιά από τις συνυπάρχουσες μνήμες-κατηγορίες διαφοροποιείται δραματικά, έτσι ώστε λίγες μνήμες διεκδικούν από πλευράς χρόνου «προσοχής» τη μερίδα του λέοντος, ενώ οι υπόλοιπες πρακτικά παραμερίζονται εντε-

λώς. Αυτή η ανομοιογενής διαλειπτότητα συνεπάγεται και την αύξηση της διαστατικότητας του βηματοδότη-ελκυστή, που από την τιμή 3-4 είναι δυνατόν να μεταπηδήσει στην τάξη του ~ 10 —δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο μια αύξηση της χωρητικότητάς του (των βαθμών ελευθερίας του) ως επεξεργαστή πληροφορίας.

Είναι, τέλος, αξιοσημείωτο ότι, κατά τη διάρκεια επιληπτικών επεισοδίων (petit-mal epilepsy), όπου σχεδόν εξ ορισμού ο νευροφυσιολογικός επεξεργαστής πληροφορίας αδρανοποιείται, η διαστατικότητα του βηματοδότη πέφτει στην τιμή ~ 2 . Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η χαοτική δυναμική προσφέρει ένα πειστικό πρότυπο ενός βιολογικού επεξεργαστή πληροφορίας που πριν από όλα πρέπει να είναι άνετα αυτοπροσαρμόσιμος.

Η υγιής καρδιά και ο υγιής εγκέφαλος, λοιπόν, λειτουργικά εμφανίζουν χαοτικούς ελκυστές μεγάλης διαστατικότητας με ευρέα συνεχή φάσματα συχνοτήτων. Κατ' αντίθεση, η άρρωστη καρδιά και ο άρρωστος εγκέφαλος εμφανίζουν λειτουργικά οιονεί περιοδική συμπεριφορά (μικρής διαστατικότητας και ισχνού διακριτού φάσματος συχνοτήτων).

Μπορούμε έτσι ίσως να πούμε ότι η επιληψία, αφενός, και η κοιλιακή μαρμαρυγή, αφετέρου, είναι ούτως ειπείν «ισομορφικές» ασθένειες: και στις δυο περιπτώσεις το αντίστοιχο βιολογικό όργανο είναι ανίκανο να λειτουργήσει ως προσαρμοστικός επεξεργαστής πληροφορίας.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σύγχρονη αντίληψη για τον τρόπο αναγνώρισης ενός ενζύμου από το υπόστρωμά του δεν αφορά στην προσαρμογή των αντίστοιχων στερεοδομών (τύπου «κλειδιού-κλειδαριάς»), αλλά μάλλον στη δυναμική αλληλεπίδραση των φασμάτων των συχνοτήτων του ενζύμου (που είναι ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα) με τον υποδοχέα του (που είναι επίσης ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα).