

Τεχνητή Εμβρυογονία και Εξέλιξη στον Αρχιτεκτονικό Σχεδιασμό: Ανάπτυξη Συστημάτων CAD στη Γλώσσα GENETICA

Α. Ι. ΒΙΡΠΑΚΗΣ

Δρ Αρχιτέκτων Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Παρουσιάζεται η εξομοίωση κυτταρικών αλληλεπιδράσεων και αναπτυξιακών διαδικασιών (εμβρυογονία) μέσω μιας νέας γενικής μεθόδου επίλυσης προβλήματος, η οποία έχει εφαρμοστεί στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό των εκφραστικών δυνατοτήτων της τυπικής λογικής με το πρότυπο του εξελικτικού υπολογισμού. Στη βάση της συγκεκριμένης προσέγγισης προδιαγράφονται τα χαρακτηριστικά μιας νέας γενιάς εφαρμογών CAD, η οποία θα υποστηρίξει τη δημιουργική συνθετική δραστηριότητα.

Ειδικότερα, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις γλώσσες GENETICA και G-CAD, μέσω των οποίων υλοποιούνται αντίστοιχα η γενική μέθοδος και η αρχιτεκτονική ερμηνεία της, επισημαίνονται τα φαινόμενα αλληλεπιδράσεων και εμβρυογονίας σε ένα συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό παράδειγμα, και δίνεται η τυπική περιγραφή μιας γενίκευσης της συγκεκριμένης προσέγγισης στη νέα γενιά εφαρμογών CAD.

1. ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Παρά τις εξελίξεις στον τομέα του λογισμικού αρχιτεκτονικών εφαρμογών, το σύνολο του λογισμικού που έχει πρακτικές εφαρμογές περιορίζεται στην υποστήριξη της σχεδίασης, την οργάνωση της μελέτης και την αυτοματοποίηση της παραγωγής αναφορών πάνω στο αρχιτεκτονικό έργο. Η υποστήριξη της δημιουργικής συνθετικής δραστηριότητας φαίνεται να περιορίζεται προς το παρόν στο πεδίο της ακαδημαϊκής έρευνας. Μεγάλο μέρος αυτής της έρευνας αφορά στον τομέα της επίλυσης προβλήματος όπου το ζητούμενο είναι η εύρεση επιθυμητών καταστάσεων (λύσεων) μέσα σε ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων, το οποίο ορίζεται μέσω συνδυαστικής παραγόντων. Το σύνολο, δομημένο με κατάλληλο τρόπο από τη μέθοδο επίλυσης, αποτελεί την «περιοχή αναζήτησης».

Προσεγγίσεις στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό ως επίλυση προβλήματος χρονολογούνται από την πρώτη περίοδο

του τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης (ΤΝ) [1; 2], ενώ πιο πρόσφατες προσεγγίσεις υιοθετούν το πρότυπο του «λογικού προγραμματισμού» [3; 4; 5; 6]. Η έλλειψη πρακτικών εφαρμογών υποστήριξης της αρχιτεκτονικής συνθετικής δραστηριότητας οφείλεται στη δυσκολία τυπικής διατύπωσης ενός αρχιτεκτονικού προβλήματος και στην αδυναμία εξαντλητικής έρευνας σε μια «περιοχή αναζήτησης» που ορίζεται μέσω συνδυαστικής: το μέγεθος μιας τέτοιας περιοχής αποτελεί εκθετική έκφραση του πλήθους των συνδυαζόμενων παραγόντων.

Δύο σύγχρονες κατευθύνσεις έρευνας στο γενικότερο τομέα ΤΝ, οι οποίες βασίζονται σε βιολογικά πρότυπα, παρέχουν μεθόδους που επιτρέπουν μια πρωτότυπη και πιθανώς αποτελεσματική αντιμετώπιση των εκφραστικών και υπολογιστικών δυσκολιών. Πρόκειται για την εξομοίωση των κυτταρικών αλληλεπιδράσεων και την εξομοίωση της βιολογικής εξέλιξης. Η πρώτη κατεύθυνση μελετά συστήματα που δομούνται από μονάδες, οι οποίες αλληλεπιδρούν με βάση συγκεκριμένους κανόνες: οι επιδράσεις που ασκεί κάθε μονάδα στο περιβάλλον της εξαρτάται από την εκάστοτε κατάστασή της, ενώ η κατάσταση αυτή εξαρτάται από τις επιδράσεις που η μονάδα δέχεται από το περιβάλλον της. Σχετικές εφαρμογές στο σχεδιασμό [7-10] εμπίπτουν στους τομείς των «κυτταρικών αυτομάτων» [11; 12], των «πολύπλοκων προσαρμοστικών συστημάτων» [13; 14] και των «συστημάτων πρακτόρων» [15; 16; 35; 36]. Η δεύτερη κατεύθυνση μελετά υπολογιστικά συστήματα που βελτιστοποιούν επιθυμητές ιδιότητες των αντικειμένων ενδιαφέροντος: πληθυσμοί τέτοιων αντικειμένων υποβάλλονται σε εξέλιξη καθώς, σε διαδοχικούς υπολογιστικούς κύκλους, χαμηλής «προσαρμογής» στοιχεία τους αντικαθίστανται από στοιχεία ψηλότερης «προσαρμογής», τα οποία προκύπτουν από «γενετικές πράξεις». Ο όρος «προσαρμογή» δηλώνει το μέτρο της επιθυμητής ιδιότητας, ενώ ο όρος «γενετική πράξη» δηλώνει τροποποίηση ή αντιμετάθεση δομικών χαρακτηριστικών των υπό εξέλιξη αντικειμένων. Σχετικές εφαρμογές στο σχεδιασμό [17-24] εμπίπτουν στο γενικότερο τομέα του «ε-

ξελικτικού υπολογισμού» και τους βασικούς κλάδους των «γενετικών αλγορίθμων» [25-27] και του «γενετικού προγραμματισμού» [28-31].

Οι εξελικτικές μέθοδοι υπερτερούν των συμβολικών μεθόδων ΤΝ ως προς τη δυνατότητα αντιμετώπισης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, υστερούν όμως ως προς τη δυνατότητα αντιμετώπισης της εκφραστικής πολυπλοκότητας. Η σύνθεση των δυνατοτήτων των δύο προσεγγίσεων έχει επιχειρηθεί σε μια γενική μέθοδο επίλυσης προβλήματος, η οποία υλοποιείται μέσω της γλώσσας GENETICA [32; 33] και εξειδικεύεται στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό μέσω της γλώσσας G-CAD (GENETICA – Computer Aided Design) [32, σ.470-479]. Τα τυπικά εκφραστικά μέσα, που παρέχει η συγκεκριμένη μέθοδος, επιτρέπουν διατυπώσεις συνθετικών προβλημάτων συμβατές με το πρότυπο της εξομοίωσης των κυτταρικών αλληλεπιδράσεων. Αυτό επιτρέπει την «από τα κάτω προς τα πάνω» (bottom up) δόμηση του αρχιτεκτονικού προβλήματος και τη σταδιακή ανάπτυξη της πολυπλοκότητας της λύσης μέσω αυθόρμητης συναρμολόγησης διαδοχικά συνθετότερων αντικειμένων από απλούστερα. Η συγκεκριμένη δυνατότητα ανταποκρίνεται στα ακόλουθα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης πρακτικής στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, τα οποία είναι δύσκολο να ενσωματωθούν σε μια τυπική μέθοδο:

- Η συνθετική μέθοδος διαμορφώνεται από το συνδυασμό επιμέρους μεθόδων, οι οποίες αφορούν σε ειδικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου σχεδιασμού. Η πολυπλοκότητα του συνδυασμού αυτού είναι τέτοια που καθιστά δύσκολη—ή και αδύνατη—την ενιαία τυπική διατύπωση του προβλήματος.
- Η ενοποίηση των επιμέρους μεθόδων επιτυγχάνεται μέσω αλληλεπιδράσεων: οι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά την εφαρμογή μιας επιμέρους μεθόδου επηρεάζουν την εφαρμογή άλλων. Έτσι η συνολική μέθοδος δεν ανταποκρίνεται στη συμβατική έννοια του «προγράμματος».
- Η αρχιτεκτονική σύνθεση διαμορφώνεται «αυξητικά» (incrementally), με διαδοχικούς μετασχηματισμούς που προκύπτουν από την εφαρμογή επιμέρους μεθόδων. Οι μετασχηματισμοί αυτοί πραγματοποιούνται είτε με προσθήκες είτε με ανασκευές στην εκάστοτε κατάσταση της σύνθεσης και αυξάνουν σταδιακά την πολυπλοκότητά της.

2. ΟΙ ΓΛΩΣΣΕΣ GENETICA ΚΑΙ G-CAD

Η GENETICA υποστηρίζεται από ένα εξελικτικό υπολογιστικό σύστημα ενσωματωμένο στο προγραμματιστικό της περιβάλλον. Ένα πρόβλημα διατυπώνεται στην GENETICA ως πρόγραμμα, το οποίο περιγράφει τη μέθοδο ανάπτυξης και τη μέθοδο αξιολόγησης πιθανών λύσεων. Η αξιολόγηση μπορεί να αφορά είτε στην επαλήθευση μιας συμβολικής έκφρασης είτε στη βελτιστοποίηση ενός κατάλληλα ορισμένου μεγέθους. Με δεδομένη τη διατύπωση του προβλήματος, το υπολογιστικό σύστημα

δημιουργεί σενάρια παραγωγής δεδομένων συμβατά με τη συγκεκριμένη διατύπωση και ασκεί σε αυτά εξελικτική βελτιστοποίηση με σκοπό την εύρεση αποδεκτής λύσης. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με την τέλεση γενετικών πράξεων πάνω σε κατάλληλες κωδικοποιήσεις των σεναρίων παραγωγής δεδομένων. Μια αποδεκτή λύση αντιπροσωπεύεται από μια δομή δεδομένων, η οποία παράγεται από ένα επαρκώς εξελιγμένο σενάριο. Ισχυρό σημείο της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι αίρει την ανάγκη ανάπτυξης μιας εξειδικευμένης στο εκάστοτε πρόβλημα υπολογιστικής μεθόδου.

Η GENETICA περιλαμβάνει την κατηγορική λογική καθώς και εκφράσεις ανώτερης τάξης, επομένως είναι εκφραστικά επαρκής για τη διατύπωση προβλημάτων γενικής μορφής. Συνέπεια της εκφραστικής επάρκειας είναι η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως βάση ανάπτυξης γλωσσών, οι οποίες εξειδικεύονται σε συγκεκριμένους τομείς ενδιαφέροντος και κάνουν χρήση του εξελικτικού υπολογιστικού της συστήματος [32, σ.470; 33, Downloads: GENETICA-based_Languages.pdf]. Η γλώσσα G-CAD αποτελεί μια τέτοια εξειδίκευση στον τομέα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Η G-CAD επιτρέπει τη διατύπωση προβλημάτων σχεδιασμού με βάση τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α) Γενική αναπαράσταση γνώσης με βάση την κατηγορική λογική και στοιχεία λογικής ανώτερης τάξης.
- β) Ενσωμάτωση γνώσης σε αντικείμενα.
- γ) Αντικείμενα με σχέση περιβάλλοντος – περιεχομένου.
- δ) Αλληλεπιδράσεις οι οποίες δρομολογούν διαδικασίες αυτοσυναρμολόγησης αντικειμένων.

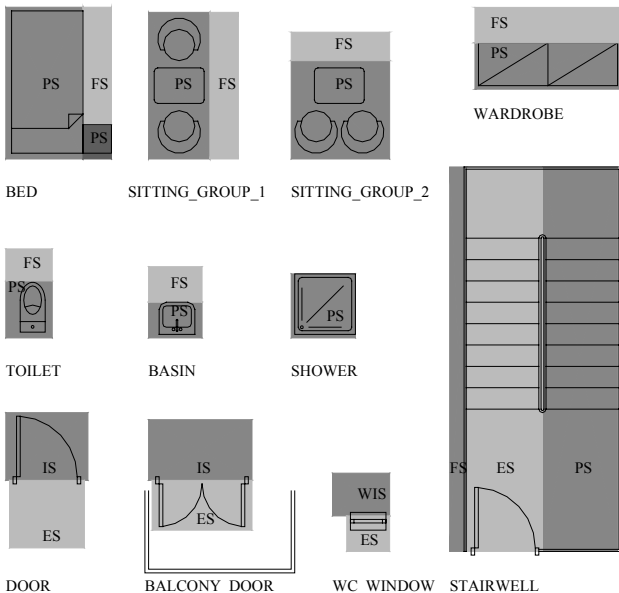
Τα χαρακτηριστικά (γ) και (δ) εμπίπτουν στο πρότυπο των κυτταρικών αλληλεπιδράσεων και επιτρέπουν τη σταδιακή ανάπτυξη αρχιτεκτονικών συνθέσεων μέσω μιας «ρητής εμβρυογονίας» (explicit embryogeny: [24], σ.36-37). Στην ενότητα 3 εντοπίζονται τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στη μέθοδο διατύπωσης και επίλυσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα και αφορά στο σχεδιασμό ενός μικρού ξενοδοχείου. Στην ενότητα 4 υποδεικνύεται μια γενική μέθοδος ανάπτυξης εφαρμογών CAD μέσω της GENETICA, με αξιοποίηση των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Στην ενότητα 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα.

3. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΝΟΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ G-CAD

3.1. Ατομικές φόρμουλες και πρωτογενή αντικείμενα

Τα πρωτογενή αντικείμενα της G-CAD ορίζονται από ατομικές φόρμουλες [32, p.471]. Αυτά είναι ορθογώνια

παραλληλόγραμμα, τα οποία τοποθετούνται στο καρτεσιανό επίπεδο και χαρακτηρίζονται από λίστες χωρικών ιδιοτήτων. Τέτοια ορθογώνια παριστάνονται ως δομημένες λίστες και αντιπροσωπεύουν κατόψεις στοιχειωδών τμημάτων αρχιτεκτονικών αντικειμένων. Ένα αρχιτεκτονικό αντικείμενο μπορεί να αναπαρασταθεί—επίσης στη μορφή δομημένης λίστας—ως συνδυασμός ορθογωνίων, ο οποίος φέρει πρόσθετες γραφικές ή λογικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα αντικείμενα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 αποτελούνται από ορθογώνια, τα οποία χαρακτηρίζονται από τις χωρικές ιδιότητες *PS* (Physical Space), *FS* (Functional Space), *IS* (Internal Space), *ES* (External Space) και *WIS* (Window Internal Space). Η ιδιότητα *PS* χαρακτηρίζει το χώρο που καταλαμβάνεται από ένα αντικείμενο και η ιδιότητα *FS* τον χώρο που πρέπει να είναι κενός προκειμένου το αντικείμενο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί (για τη διάκριση μεταξύ τέτοιων χώρων βλ. επίσης [34]). Οι ιδιότητες *IS* και *WIS* χαρακτηρίζουν τον εφαιπτόμενο σε άνοιγμα εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου και η ιδιότητα *ES* τον αντίστοιχο εξωτερικό χώρο. Άλλες γραφικές ιδιότητες των αντικειμένων παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 1 με τη μορφή σχεδίων. Οι λογικές ιδιότητες περιγράφουν επιτρεπόμενες σχέσεις επικάλυψης μεταξύ περιοχών των αντικειμένων που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές χωρικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα προβλέπεται μη επικάλυψη της ιδιότητας *PS* ενός αντικειμένου με τις ιδιότητες *PS*, *FS*, *IS* και *ES* άλλου αντικειμένου.



Σχήμα 1: Στοιχειώδη αρχιτεκτονικά αντικείμενα.
Figure 1: Elementary architectural objects.

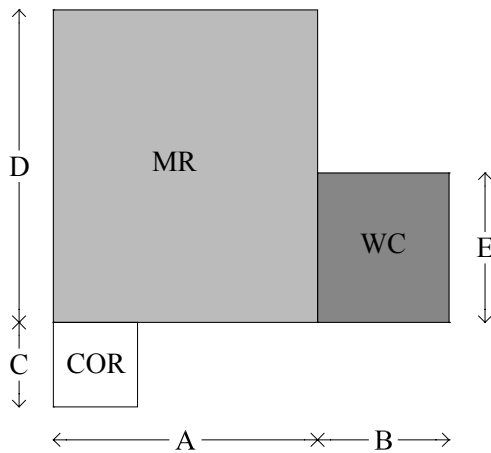
Οι παραπάνω ορισμοί προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα πρωτογενή αντικείμενα αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους, το οποίο ενδεχομένως αποτελείται από άλλα

τέτοια αντικείμενα. Έτσι, προδιαγράφεται η πρώτη φάση της εμβρυογονίας. 3.2. Μη ατομικές φόρμουλες και σύνθετα αντικείμενα

3.2. Μη ατομικές φόρμουλες και σύνθετα αντικείμενα

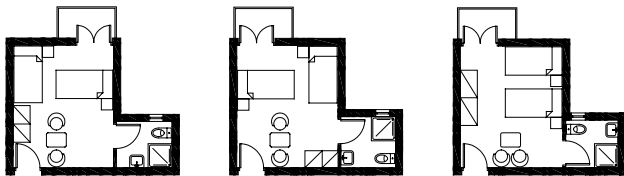
Τα σύνθετα αντικείμενα της G-CAD ορίζονται από μη ατομικές φόρμουλες [32, p.472]. Οι μη ατομικές φόρμουλες κατασκευάζονται με λογικά συνδετήρια, ποσοδείκτες, ή ειδικά συνδετήρια που δηλώνουν είτε αναδρομή υπό συνθήκη είτε βελτιστοποίηση [32, σ.472; 33, Downloads: G-CAD_Documentation.pdf, σ.9-11]. Περιλαμβάνουν αναφορές σε αντικείμενα G-CAD και προδιαγραφές για την τοποθέτηση τέτοιων αντικειμένων σε άλλα τα οποία διαμορφώνουν περιβάλλον. Οι προδιαγραφές διατυπώνονται ως λογικές προτάσεις, οι οποίες αναφέρονται στις χωρικές και λογικές ιδιότητες των επιμέρους αντικειμένων. Οι επιλογές, οι οποίες δεν ορίζονται μονοσήμαντα από τις προδιαγραφές αυτές, πραγματοποιούνται τυχαία και υποβάλλονται σε εξέλιξη από το υπολογιστικό σύστημα της GENETICA με στόχο την επαλήθευση της φόρμουλας G-CAD που αντιπροσωπεύει το πρόβλημα και ενδεχομένως την βελτιστοποίηση κάποιας ορισμένης μέσα στο πρόγραμμα ποσοτικής ιδιότητας της λύσης.

Το αντικείμενο, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, αντιπροσωπεύει ένα διαμέρισμα και ορίζεται από τη μη ατομική φόρμουλα *Apartment*. Το συγκεκριμένο αντικείμενο αποτελεί περιβάλλον μέσα στο οποίο τοποθετούνται ορισμένα αντικείμενα από αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Το «διαμέρισμα» αποτελείται από τρία μεταβλητών διαστάσεων ορθογώνια, τα οποία φέρουν αντίστοιχα τις χωρικές ιδιότητες *MR* (Main Room), *WC* (Water Closet) και *COR* (Corridor), ενώ οι διαστάσεις τους (Σχήμα 2) ικανοποιούν τη σχέση $A + B = C + D$ και εξασφαλίζουν συγκεκριμένο μέγιστο και ελάχιστο εμβαδόν των ορθογωνίων *MR* και *WC*. Η φόρμουλα *Apartment* ορίζει την τοποθέτηση στο συγκεκριμένο περιβάλλον δύο αντικειμένων τύπου *Door*, δύο αντικειμένων τύπου *Bed*, ενός από τα αντικείμενα τύπου *Sitting_Group_1* και *Sitting_Group_2*, και ενός αντικειμένου καθενός από τους τύπους *Balcony_Door*, *WC_Window*, *Wardrobe*, *Toilet*, *Basin* και *Shower*. Οι ενσωματωμένες στο «διαμέρισμα» λογικές ιδιότητες προβλέπουν επικάλυψη της ιδιότητας *MR* του «διαμερίσματος» με καθεμία από τις ιδιότητες *PS* και *FS* των αντικειμένων τύπου *Bed*, *Wardrobe*, *Sitting_Group_1* και *Sitting_Group_2* και επικάλυψη της ιδιότητας *WC* του «διαμερίσματος» με καθεμία από τις ιδιότητες *PS* και *FS* των αντικειμένων τύπου *Toilet*, *Basin* και *Shower*. Οι προδιαγραφές τοποθέτησης περιλαμβάνουν επίσης λογικές ιδιότητες που δηλώνουν σχέσεις χωρικών ιδιοτήτων: π.χ. η τοποθέτηση πόρτας εισόδου στο «διαμέρισμα» προδιαγράφεται ως τοποθέτηση του ορίου *ES-IS* ενός αντικειμένου *Door* στο όριο *COR-MR* του «διαμερίσματος».



Σχήμα 2: Πρωτογενής μορφή του αντικειμένου «διαμέρισμα».
Figure 2: Primitive form of the object «apartment».

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει σε μορφή αρχιτεκτονικού σχεδίου εξελιγμένα αντικείμενα τύπου «διαμέρισμα», δηλαδή όρους G-CAD που ο καθένας προέκυψε από μια διαφορετική επαλήθευμένη κλήση της φόρμουλας Apartment. Η επαλήθευση πραγματοποιήθηκε μέσω του εξελικτικού υπολογιστικού συστήματος της GENETICA. Τα αντικείμενα αυτά—όπως κάθε μη ατομικός όρος G-CAD—έχουν τη μορφή δομημένης λίστας. Η ερμηνεία τους σε αρχιτεκτονικά σχέδια πραγματοποιείται μέσω ενός CAD interface, το οποίο κάνει χρήση των γραφικών ιδιοτήτων των επιμέρους αντικειμένων ενώ τοποθετεί τοίχους διαφορετικού πάχους στα όρια μεταξύ περιοχών του καρτεσιανού επιπέδου, οι οποίες φέρουν διαφορετικές χωρικές ιδιότητες.



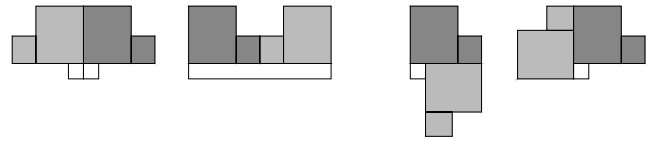
Σχήμα 3: Εξελιγμένα αντικείμενα τύπου «διαμέρισμα» σε μορφή αρχιτεκτονικού σχεδίου.
Figure 3: Evolved «apartment» objects having the form of architectural designs.

Η μέσω μη ατομικών φορμουλών περιγραφή αλληλεπιδράσεων μεταξύ απλούστερων αντικειμένων για την ανάπτυξη συνθετότερων προδιαγράφει τις ανώτερες φάσεις της εμβρυογονίας. Έτσι, η ανάπτυξη της σύνθεσης μπορεί να έχει επαγωγικό χαρακτήρα από τα κατώτερα προς τα ανώτερα επίπεδα πολυπλοκότητας.

3.3. Το πρόβλημα σχεδιασμού ως μη ατομική φόρμουλα

Το αρχιτεκτονικό πρόβλημα αφορά στο σχεδιασμό ενός

αντικειμένου υψηλής πολυπλοκότητας. Τέτοια αντικείμενα κατασκευάζονται από μη ατομικές φόρμουλες, οι οποίες αναφέρονται σε σύνθετα αντικείμενα που κατασκευάζονται από άλλες μη ατομικές φόρμουλες.



Σχήμα 4: Κανόνες προσάρτησης νέου «διαμερίσματος» (ανοικτό γκρι) σε υπάρχον (σκούρο γκρι).
Figure 4: Rules for attaching a new «apartment» (light gray) to an existing one (dark gray).

Η μη ατομική φόρμουλα *Hotel* περιγράφει το αντικείμενο «ξενοδοχείο», το οποίο περιλαμβάνει οκτώ «διαμερίσματα» και ένα αντικείμενο τύπου *Stairwell* (βλ. Σχήμα 1). Τα «διαμερίσματα» συνδυάζονται με βάση οποιονδήποτε από τους κανόνες, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Το αντικείμενο τύπου *Stairwell* τοποθετείται έτσι ώστε το περιλαμβανόμενο σε αυτό ορθογώνιο *ES* να εδράζεται στη βάση του σε περιοχή *COR*. Οι λογικές ιδιότητες του αντικειμένου «ξενοδοχείο» επιτρέπουν την επικάλυψη μόνο μεταξύ περιοχών *COR*. Η φόρμουλα *Hotel* προβλέπει, επίσης, την ελαχιστοποίηση του συνολικού εμβαδού της κάτοψης του «ξενοδοχείου». Το εμβαδόν αποτελεί αριθμητική ιδιότητα, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από μια κατάλληλη ατομική φόρμουλα για κάθε συνδυασμό χωρικών ιδιοτήτων τοποθετημένων στο Καρτεσιανό επίπεδο. Στην περίπτωση του αντικειμένου «ξενοδοχείο» υπολογίζεται το εμβαδόν της περιοχής που ορίζεται από την έκφραση (*MR* or *WC* or *COR*), όπου το σύμβολο "or" αντιπροσωπεύει το γνωστό λογικό συνδετήριο.

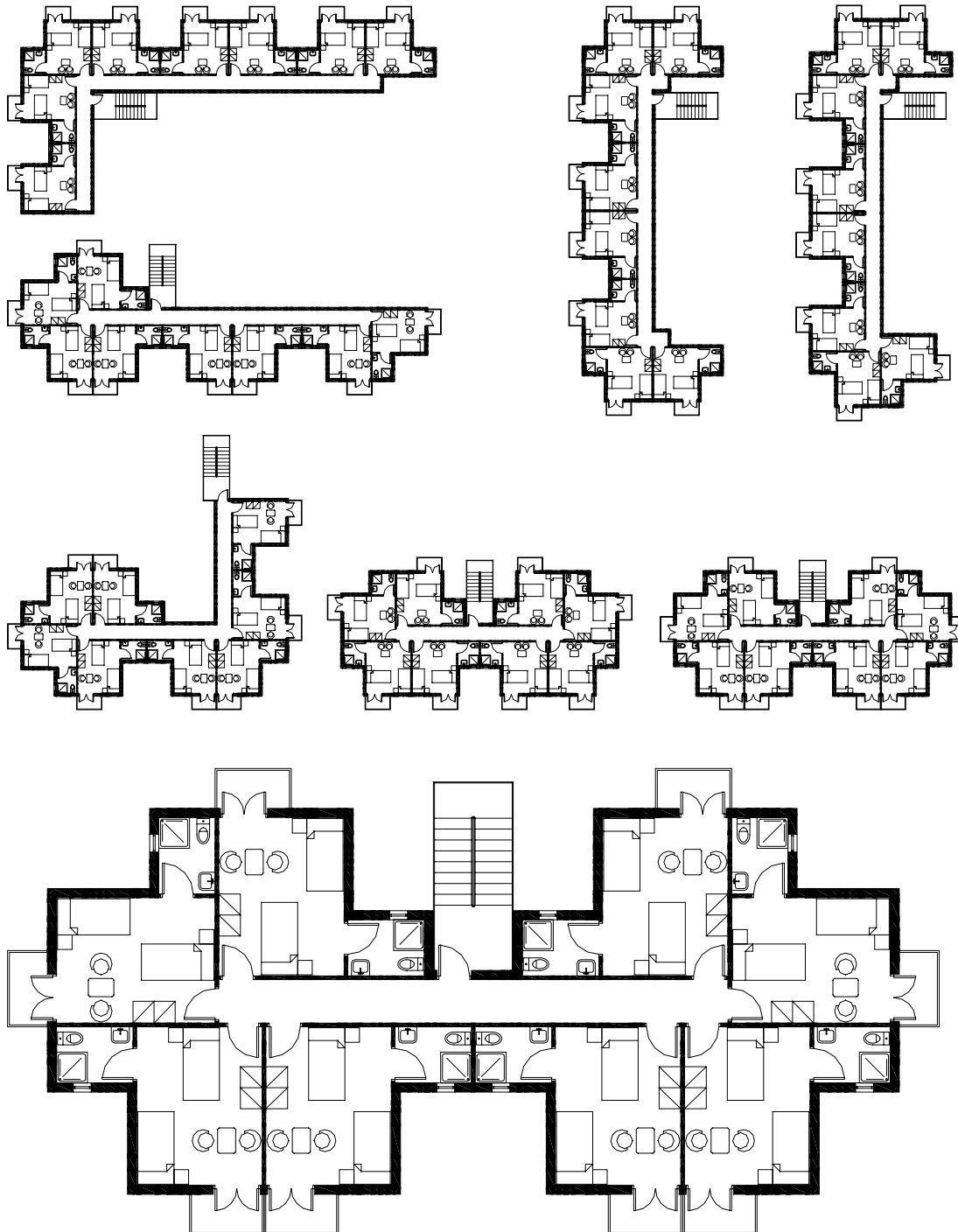
Η φόρμουλα *Hotel* προδιαγράφει την τελική φάση της εμβρυογονίας στο πλαίσιο της επαγωγικής διαδικασίας η οποία περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2. Η συγκεκριμένη φάση αντιστοιχεί στην ολοκλήρωση της ανάπτυξης της σύνθεσης. Το αρχιτεκτονικό πρόβλημα που περιγράφει η φόρμουλα *Hotel* είναι ένα σύνθετο πρόβλημα το οποίο περιλαμβάνει στόχους επαλήθευσης και βελτιστοποίησης. Οι στόχοι αυτοί συνδυάζονται σε τρία αλληλοεξαρτώμενα συνθετικά επίπεδα:

- τοποθέτηση στο «διαμέρισμα» αντικειμένων (επίπλων, ανοιγμάτων, ειδών υγιεινής) συμβατών με τους κανόνες επικάλυψης,
- ορισμός διαστάσεων διαμερίσματος, συμβατών με τη διάταξη των αντικειμένων στο διαμέρισμα και το κριτήριο του ελάχιστου εμβαδού,
- εύρεση διάταξης «διαμερισμάτων» και αντικειμένου τύπου *Stairwell* συμβατής με τους κανόνες συνδυασμού «διαμερισμάτων», τους κανόνες επικάλυψης και το κριτήριο του ελάχιστου εμβαδού.

Το πρόγραμμα G-CAD αντιπροσωπεύει μόνο τη διατύπωση του προβλήματος και δεν περιλαμβάνει καμία

μέθοδο επίτευξης των παραπάνω στόχων. Η μέθοδος παρέχεται από το υπολογιστικό σύστημα της GENETICA και βασίζεται στην εξέλιξη σεναρίων παραγωγής δεδομένων του προγράμματος G-CAD με κριτήριο την επίτευξη των συγκεκριμένων στόχων. Επίσης, το επίπεδο πολυπλοκότητας της τελικής σύνθεσης δεν εκφράζεται στο πρόγραμμα

G-CAD: το πρόγραμμα προδιαγράφει μόνο το είδος των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αντικειμένων (τα οποία ενδεχομένως έχουν σχέσεις περιβάλλοντος-περιεχομένου), αφήνοντας στη διαδικασία της εμβρυογονίας την ανάπτυξη της πολυπλοκότητας που παράγεται από αυτές τις αλληλεπιδράσεις.



Σχήμα 5: Διαδοχικές φάσεις εξέλιξης αντικειμένου τύπου «ξενοδοχείο», από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω.
 Figure 5: Successive phases of evolution of a «hotel» object, from left to right and from top to bottom.

3.4. Αποτελέσματα

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει σε μορφή αρχιτεκτονικού σχεδίου αντικείμενα τύπου «ξενοδοχείο», δηλαδή όρους που ο καθένας προέκυψε από μια διαφορετική επαληθευμένη κλήση της φόρμουλας *Hotel*. Τα αντικείμενα αυτά, από αριστερά προς τα δεξιά και από πάνω προς τα κάτω, προέκυψαν σε διαδοχικές φάσεις βελτιστοποίησης, οι οποίες ακολούθησαν αυτές της επαλήθευσης. Τόσο η επαλήθευση όσο και η βελτιστοποίηση αποτελούν μέρη της ενιαίας εξελικτικής διαδικασίας, που πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού συστήματος της GENETICA. Το τελευταίο αντικείμενο, το οποίο παρουσιάζεται μεγεθυμένο, αποτελεί λύση ελαχίστου εμβαδού.

Μια αναλυτική περιγραφή της εξελικτικής διαδικασίας παρουσιάζεται στο [33, Downloads: Design_Evolution.ppt]. Αναλυτικότερα στοιχεία για την G-CAD και την εφαρμογή σχεδιασμού ξενοδοχείου παρουσιάζονται στα [32, σ.470-479, 33, Downloads: G-CAD_Documentation.pdf]. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε με μια prototype version της GENETICA, η οποία είναι διαθέσιμη στο [33, Downloads: proto.exe] συνοδευόμενη από documentation και tutorials [33, Downloads: GENETICA_Documentation.pdf].

3.5. Οπτικοποίηση της εξελικτικής υπολογιστικής διαδικασίας

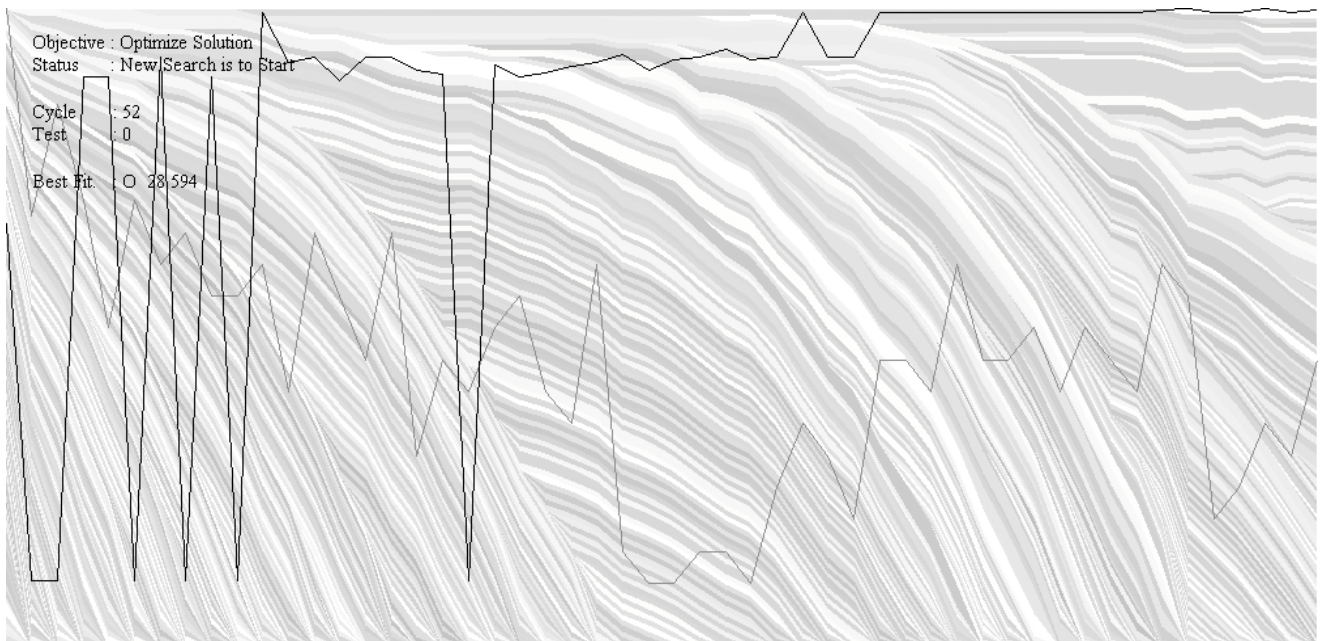
Το υπολογιστικό σύστημα της GENETICA επιτρέπει

την οπτικοποίηση της εξελικτικής διαδικασίας. Η κάτω και η αριστερή πλευρά της σκιασμένης περιοχής, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6, παριστάνουν αντίστοιχα τον οριζόντιο και τον κάθετο άξονα ενός διαγράμματος. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το χρόνο σε υπολογιστικούς κύκλους. Στον κάθετο άξονα αντιπροσωπεύονται οι ακόλουθες ιδιότητες της κατάστασης αναζήτησης λύσης:

- α) Η εξέλιξη των «ειδών», όπου κάθε «είδος» αντιπροσωπεύει ένα σύνολο όμοιων σεναρίων παραγωγής δεδομένων. Τα «είδη» παριστάνονται ως ζώνες διαφορετικού τόνου διατεταγμένες κατά αύξουσα σειρά «προσαρμογής» από τα κάτω προς τα πάνω στο διάγραμμα. Το πάχος κάθε ζώνης δηλώνει συγκριτικά το μέγεθος του αντίστοιχου «είδους». Νέα «είδη» βέλτιστης προσαρμογής εμφανίζονται στην κορυφή του διαγράμματος, ενώ στη βάση του πραγματοποιείται εξαφάνιση «ειδών».
- β) Η βέλτιστη προσαρμογή ανά υπολογιστικό κύκλο, η οποία παριστάνεται ως μαύρη γραμμή.
- γ) Το ποσοστό των νέων «ειδών» που εισάγονται στον πληθυσμό, στο σύνολο των νέων «ειδών» που παράγονται σε κάθε υπολογιστικό κύκλο, το οποίο παριστάνεται ως γκριζα γραμμή.

4. ΠΡΟΣ ΜΙΑ ΝΕΑ ΓΕΝΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ CAD

Η προσέγγιση στην επίλυση προβλήματος η οποία υλοποιείται μέσω της γλώσσας GENETICA, καθώς και



Σχήμα 6: Οπτικοποίηση της εξελικτικής υπολογιστικής διαδικασίας κατά την εφαρμογή σχεδιασμού ξενοδοχείου.
Figure 6: Visualization of the evolutionary computational process during the hotel design application.

η έκφρασή της στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, η οποία υλοποιείται μέσω της γλώσσας G-CAD, βασίζεται στην υποστήριξη της τυπικής έκφρασης (στην πλέον γενική της μορφή) από εξελικτική μέθοδο. Η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή την εξελικτική ανάπτυξη σύνθετων οντοτήτων μέσω της αλληλεπίδρασης απλούστερων, των οποίων οι σχέσεις διατυπώνονται σε τυπική μορφή. Προτείνεται ο συνδυασμός της συγκεκριμένης προσέγγισης με υπάρχουσες τεχνολογίες CAD και ευφυών συστημάτων, με σκοπό την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς εφαρμογών CAD, η οποία θα υποστηρίζει το δημιουργικό μέρος του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Συγκεκριμένα προτείνεται η χρήση της γλώσσας GENETICA σε δυο τομείς ανάπτυξης εφαρμογών CAD:

- γενίκευση των γνωστών από εμπορικές εφαρμογές object oriented συστημάτων, έτσι ώστε αυτά να αποκτήσουν δυνατότητες επίλυσης προβλήματος,
- ανάπτυξη προσαρμοστικών συστημάτων, των οποίων οι διαδικασίες αυτοοργάνωσης θα υποστηρίζονται από το εξελικτικό σύστημα της GENETICA.

Στη συνέχεια δίνονται σε τυπική μορφή οι προδιαγραφές των αλληλεπιδρώντων οντοτήτων των προτεινόμενων εφαρμογών.

4.1. Γενίκευση object oriented συστημάτων CAD

Τα object oriented συστήματα CAD περιλαμβάνουν «αντικείμενα» (objects), τα οποία ορίζονται με ιδιότητες. Κάθε «αντικείμενο» αντιπροσωπεύει μια απεικόνιση από ένα σύνολο A διανυσμάτων ιδιοτήτων σε ένα σύνολο I εκδοχών (instances) του «αντικειμένου». Π.χ. η θέση, οι διαστάσεις και ο τύπος ενός παραθύρου (συντεταγμένες του διανύσματος), απεικονίζονται στο μοναδικό «παράθυρο», το οποίο φέρει τις συγκεκριμένες ιδιότητες. Κάθε συνδυασμός τιμών των ιδιοτήτων αντιπροσωπεύει ένα στοιχείο του A και μέσω της απεικόνισης προσδιορίζει μονοσήμαντα μια εκδοχή (στοιχείο του I). Ο συγκεκριμένος ορισμός του «αντικειμένου» μπορεί να γενικευτεί, αν ο προσδιορισμός των εκδοχών του από τις ιδιότητες θεωρηθεί ως μη αιτιοκρατικός και συνοδεύεται από ένα κριτήριο επιλογής. Τότε το γενικευμένο «αντικείμενο» περιλαμβάνει διαδικασία επίλυσης προβλήματος. Συγκεκριμένα το γενικευμένο «αντικείμενο» ορίζεται ως ζεύγος (g, f) , όπου g η απεικόνιση από το A στο σύνολο $\wp(I)$ των υποσυνόλων του I και f η λογική ή αριθμητική συνάρτηση ορισμένη στο I . Αν $a \xrightarrow{g} P$ [$a \in A, P \in \wp(I)$], το σύνολο P αντιπροσωπεύει την περιοχή αναζήτησης ενός προβλήματος, του οποίου το κριτήριο επιλογής αποδεκτών λύσεων αντιπροσωπεύεται από τη συνάρτηση f . Π.χ. στο αντικείμενο «διαμέρισμα» της εφαρμογής σχεδιασμού ξενοδοχείου, το διάνυσμα a αντιπροσωπεύει προδιαγραφές δωματίων και τοποθέτησης αντικειμένων μέσα σε αυτά, το σύνολο P όλες τις πιθανές εκδοχές δωματίων και διατάξεων των αντικειμένων μέσα σε αυτά, και η συνάρτηση f τη λογική συνάρτηση που ορίζεται από τις προδιαγραφές.

Η τυπική διατύπωση του γενικευμένου «αντικειμένου» στην GENETICA επιτρέπει τον προσδιορισμό της επιθυμητής συμπεριφοράς του—ενδεχομένως μέσα σε ένα περιβάλλον που περιλαμβάνει και άλλα «αντικείμενα»—μέσω του ενσωματωμένου στο περιβάλλον GENETICA εξελικτικού υπολογιστικού συστήματος. Συγκεκριμένα οι περιεχόμενες στη διατύπωση στοχαστικές αποφάσεις υποβάλλονται σε εξέλιξη με κριτήριο την επαλήθευση ή / και βελτιστοποίηση της f . Εφόσον το πρόβλημα επιλυθεί επιτυχώς, η εξέλιξη καταλήγει στον προσδιορισμό ενός στοιχείου του P . Το στοιχείο αυτό αποτελεί λύση.

4.2. Ανάπτυξη προσαρμοστικών συστημάτων CAD

Τα προσαρμοστικά συστήματα περιγράφονται από τη δυναμική σχέση μιας οντότητας, η οποία ενδεχομένως αποτελεί σύστημα επιμέρους οντοτήτων, με το περιβάλλον της (βλ. ενδεικτικά [14], [35], [36]). Π.χ. κάνοντας μια απλή συσχέτιση με την εφαρμογή, η οποία παρουσιάστηκε στην ενότητα 3, η οντότητα μπορεί να αντιστοιχεί στο σύνολο των επίπλων του διαμερίσματος και το περιβάλλον στο διαμέρισμα. Στο πλαίσιο αυτής της δυναμικής σχέσης το περιβάλλον αλλάζει λόγω επιδράσεων που δέχεται από την οντότητα και ενδεχομένως από εξωτερικούς παράγοντες, ενώ και η οντότητα αλλάζει λόγω επιδράσεων που δέχεται από το περιβάλλον. Η συγκεκριμένη σχέση μπορεί να έχει επιθυμητά χαρακτηριστικά (όπως αυτά που εκφράζουν την προσαρμογή της οντότητας στο περιβάλλον) και επομένως το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει διαδικασίες επίλυσης προβλήματος. Στη συνέχεια παραθέτουμε ένα γενικό τυπικό ορισμό τέτοιου συστήματος.

Θεωρούμε τα σύνολα χρονοσειρών E, S, A και EXT , όπου κάθε χρονοσειρά είναι μια διανυσματική συνάρτηση του χρόνου ορισμένη στο διάστημα $T = [0, tmax]$. Αν $(e, s, a, ext) \in E \times S \times A \times EXT$, τότε η e αντιπροσωπεύει την κατάσταση του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ορίζεται μια σχεδιαστική οντότητα, η s την κατάσταση της οντότητας, η a την επίδραση της οντότητας στο περιβάλλον και η ext εξωτερικές επιδράσεις στο περιβάλλον. Οι χρονοσειρές συνδέονται με τις σχέσεις $(a(t), s'(t)) = b(e(t), s(t))$ και $e'(t) = g(a(t), ext(t))$ [$t \in T$] (ο τόνος δηλώνει πρώτη παράγωγο ως προς t), όπου οι συναρτήσεις b και g χαρακτηρίζουν αντίστοιχα τη συμπεριφορά της οντότητας και του περιβάλλοντος. Εστω ότι η g είναι δεδομένη, ενώ η b ανήκει σε ένα σύνολο B πιθανών συμπεριφορών της οντότητας.

Κάθε στοιχείο του συνόλου $D = \{(e(0), ext)\}$ ($e, ext \in E \times EXT$) αντιπροσωπεύει μια αρχική κατάσταση του περιβάλλοντος και ένα σενάριο εξωτερικών επιδράσεων πάνω σε αυτό, ενώ κάθε στοιχείο του συνόλου $P = \{(s(0), b) : (s, b) \in S \times B\}$ αντιπροσωπεύει μια αρχική κατάσταση και μια πιθανή συνάρτηση συμπεριφοράς της οντότητας. Για κάθε στοιχείο του P ορίζεται από τις σχέσεις μεταξύ των χρονοσειρών μια απεικόνιση από το D μέσα

στο $E \times S$. Το τελευταίο περιλαμβάνει τα πιθανά σενάρια χρονικής εξέλιξης του συστήματος οντότητα-περιβάλλον. Μπορεί να οριστεί στο σύνολο των πιθανών απεικονίσεων, και μέσω αυτού στο P , μια λογική ή αριθμητική συνάρτηση f η οποία αντιπροσωπεύει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του συστήματος οντότητα-περιβάλλον. Έτσι μπορεί να διατυπωθεί τυπικά ένα πρόβλημα εύρεσης της αρχικής κατάστασης και της συμπεριφοράς της οντότητας, με δεδομένο ένα σύνολο πιθανών αρχικών καταστάσεων περιβάλλοντος και πιθανών σεναρίων εξωτερικών επιδράσεων σε αυτό, ώστε να επιτευχθεί μια επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος οντότητα-περιβάλλον.

Η παραπάνω διατύπωση είναι ενδεικτική μιας σειράς πιθανών διατυπώσεων προβλημάτων που αφορούν σε σχεδιασμό προσαρμοστικών συστημάτων CAD. Χαρακτηριστική κάθε διατύπωσης είναι η ύπαρξη ενός συνόλου P πιθανών λύσεων και μιας συνάρτησης f αξιολόγησης πιθανών λύσεων. Εφόσον το σύνολο P ορίζεται από τη συνδυαστική των περιεχόμενων στην τυπική διατύπωση του προβλήματος στοχαστικών αποφάσεων, η υλοποίηση μιας εξελικτικής διαδικασίας επίλυσης μπορεί να εξασφαλιστεί από το υπολογιστικό σύστημα της GENETICA.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εξομοίωση κυτταρικών αλληλεπιδράσεων και η χρήση της στην εφαρμογή αναπτυξιακών διαδικασιών (εμβρυογονία) επιτρέπει την αποτελεσματική υποστήριξη της δημιουργικής συνθετικής δραστηριότητας στον υπολογιστή. Επίσης ανταποκρίνεται σε χαρακτηριστικά της αντίστοιχης ανθρώπινης δραστηριότητας τα οποία είναι δύσκολο να εκφραστούν με τυπικό τρόπο. Απαραίτητη προϋπόθεση εφαρμογής της συγκεκριμένης προσέγγισης σε πολύπλοκα προβλήματα, όπως αυτό του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, είναι η χρήση επαρκών εκφραστικών και υπολογιστικών μέσων. Ο συνδυασμός της γενικής τυπικής έκφρασης με μεθόδους εξελικτικού υπολογισμού, ο οποίος στην εφαρμογή που παρουσιάστηκε βασίζεται στη γλώσσα GENETICA, προσφέρει μια κατάλληλη βάση ανάπτυξης τέτοιων εφαρμογών. Αυτό καθιστά δυνατή τη γενίκευση των object oriented συστημάτων CAD, καθώς και την ανάπτυξη προσαρμοστικών συστημάτων CAD.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C. M. Eastman, "Logical Methods of building design : a synthesis and review," **DMG-DRS Journal: Design research and methods**, vol. 6 (3), 1972, σ. 79-87.
2. W. J. Mitchell, "The theoretical foundation of computer-aided architectural design," **Environment and Planning B: Planning and Design**, vol. 2, 1975, σ. 127-150.
3. P.S.G. Swinson, "PROLOG: A prelude to a new generation of CAAD," **Computer Aided Design**, vol. 15, n.6, 1983, σ. 335-343.
4. R. D. Coyne, J. S. Gero, "Logic programming as a means of representing semantics in design languages," **Environment and Planning B: Planning and Design**, vol. 12, 1985, σ. 351-369.
5. R. D. Coyne, J. S. Gero, "Design knowledge and sequential plans," **Environment and Planning B: Planning and Design**, vol. 12, 1985, σ. 401-418.
6. R. D. Coyne, J. S. Gero, "Design knowledge and context," **Environment and Planning B: Planning and Design**, vol. 12, 1985, σ. 419-442.
7. J. Cheng, I. Masser, "Understanding spatial and temporal processes of urban growth: cellular automata modeling", **Environment and Planning B: Planning and Design** vol. 31(2), 2004, σ. 167-194.
Διαθέσιμο: <http://www.envplan.com/epb/abstracts/b31/b2975.html>
8. R. Holden, I. Parmee, "Evolutionary Spatial Layout Utilising Agent-Based Models of Crowd Behaviours", **Proceedings of ACDM 2000**, PEDC, University of Plymouth, 2000.
Διαθέσιμο: http://www.tech.plym.ac.uk/soc/research/neural/STAFF/Rholden/Papers/ACDM2000_pdf.pdf
9. R. J. Krawczyk, "Experiments in Architectural Form Generation Using Cellular Automata", **Education in Computer Aided Architectural Design in Europe eCAADe 2002 Conference**, Warsaw, Poland, 2002.
Διαθέσιμο: <http://www.iit.edu/~krawczyk/rkecad02.pdf>
10. F. Scheurer, "The Groningen Twister - an experiment in applied generative design", in C. Soddu, **Generative Art 2003, proceedings of the 6th International Conference GA2003**, 2003, σ. 90-99.
Διαθέσιμο: <http://www.caad.arch.ethz.ch/CAAD-Extern/1013>
11. J. von Neumann, **Theory of Self-Reproducing Automata**, Burks AW (ed), University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1966.
12. S. Wolfram, **A New Kind Of Science**, Wolfram Media, 2002.
13. S.A. Kauffman, **The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution**, Oxford University Press Inc, USA, 1993.
14. M.S. Voss, "Complex Adaptive Systems + Soft Computing = Emergent Design Systems (EDS)", **Proceedings Third IASTED International Conference - Artificial Intelligence and Soft Computing, July 24-26**, Banff, Alberta, Canada, 2000.
Διαθέσιμο: <http://www.evolutionarystructures.com/papers/316-071pdf.PDF>
15. E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, **Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems**, Oxford University Press Inc, USA, 1999.
16. G. Weiss, **Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence**, MIT Press, 2000.
17. L. Virirakis, "The continuous search space design method (CSSDM)," **Environment and Planning B: Planning and Design**, vol. 20, 1993, σ. 617-643.
18. M. A. Rosenman, and J. S. Gero, "Evolving designs by generating useful complex gene structures," in **Evolutionary Design by Computers**, P. Bentley, Ed. London: Morgan Kaufmann, 1999, σ. 345-364.
Διαθέσιμο: <http://www.arch.su.EDU.AU/~john/publications/PDF2/99Rosen1.pdf>
19. A.G. De Silva Garza and M. L. Maher, "A process model for evolutionary design case adaptation," in **Artificial Intelligence in Design 00**, J. S. Gero, Ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, σ. 393-412.
Διαθέσιμο: http://www.arch.usyd.edu.au/%7Echris_a/MaherPubs/2000pdf/MaherAID00.pdf
20. R. Jagielski, and J.S. Gero, "A genetic programming approach to the space layout planning problem," in **CAAD Futures 1997**, R. Junge Ed. Kluwer, Dordrecht, 1997, σ. 875-884.
Διαθέσιμο: <http://www.arch.usyd.edu.au/~john/publications/97PDF/97JagielskiGeroCAADFutur.pdf>
21. J. S. Gero, and V. Kazakov, "Adapting evolutionary computing for exploration in creative designing," in **Computational Models of Creative Designing**, J. S. Gero, M. L. Maher Eds. Sydney, Australia: Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sydney, 1999, σ. 175-186.
Διαθέσιμο: <http://www.arch.usyd.edu.au/~john/publications/PDF2/98GeroKazakovHI98Adapt.pdf>
22. J. S. Gero, "Novel models in evolutionary designing," in **Simulated Evolution and Learning: selected papers / Second Asia Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning SEAL '98**, B. McKay, X. Yao, C. S. Newton, J-H. Kim, T. Furuhashi Eds. Berlin, Heidelberg, New

York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo: Springer-Verlag, 1999, σ. 381-388.

23. J. S. Gero, and X-G. Shi, "Design development based on an analogy with developmental biology," in **CAADRIA'99**, J. Gu, and Z. Wei, Eds. Shanghai, China: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1999, σ. 253-264.

Διαθέσιμο: <http://www.arch.su.edu.au/~john/publications/PDF2/99GeroShiCAADRIA.pdf>

24. P. Bentley, and S. Kumar, "Three ways to grow designs: a comparison of embryogenies for an evolutionary design problem," in **GECCO-99 Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference**, W. Banzhaf, J. Daida, A. E. Eiben, M. H. Garzon, V. Honavar, M. Jakiela, R.E. Smith, Eds. San Francisco, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1999, σ. 35-43.

25. J. H. Holland, **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence**, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.

26. D. E. Goldberg, **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.

27. M. Mitchell, **An Introduction to Genetic Algorithms**, Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

28. J. R. Koza, **Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection**, Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

29. J. R. Koza, **Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs**, Cambridge, MA: MIT Press, 1994.

30. J. R. Koza, F.H. Bennett, D. Andre, and M.A. Keane, **Genetic Programming III Darwinian Invention and Problem Solving**, San Francisco, California: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.

31. W. Banzhaf, P. Nordin, R.E. Keller, and F.D. Francone, **Genetic Programming—An Introduction**, San Francisco: Morgan Kaufmann, Heidelberg Germany: dpunkt.verlag, 1998.

32. L. Virirakis, "GENETICA: A Computer Language That Supports General Formal Expression With Evolving Data Structures", **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v.7, i.5, 2003, pp. 456-481.

33. www.genetica-informatics.org

34. Κ. Κυριαζόπουλος, **Το πρόγραμμα CADRAM: μια εφαρμογή στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό βασισμένη στην μέθοδο διάταξης ορθογωνίων**, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα αρχιτεκτόνων ΕΜΠ, 1995.

35. E.S. Tzafestas, «Compromising algorithmicity and plasticity in autonomous agent control systems : The motivated, social cell", **Journal of Intelligent Systems**, 9(2):135-176, 1999. Διαθέσιμο:

<http://www.softlab.ece.ntua.gr/~brensham/Publications/IntSysJ99.pdf>

36. E.S. Tzafestas, „Performance self-assessment by and for regulation in autonomous agents“, **Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems**, Washington, DC, August 2000. Διαθέσιμο: <http://www.softlab.ece.ntua.gr/~brensham/Publications/>

Extended Summary

Artificial Embryogeny and Evolution in Architectural Design: Development of CAD Systems in the Language GENETICA

L. I. VIRIRAKIS

Dr Architect Engineer N.T.U.A.

Abstract

This paper presents simulated cellular interactions and developmental processes in a new general problem-solving method which combines general formal expression with evolutionary computation and has been applied to architectural design. The general method and its architectural interpretation have been implemented through the languages GENETICA and G-CAD, respectively. The presentation includes a case study, while a new generation of creative CAD applications based on evolving interactive objects is proposed.

1. INTRODUCTION

Architectural design problems are known to be difficult both to formulate and to solve on the computer. They are characterized by a high complexity that is hard to deal with by formal expressive or computational means. Two branches of investigation, within the framework of Artificial Intelligence, provide methods potentially effective in formulating and solving architectural design problems: simulation of cellular interaction and simulation of natural evolution.

Simulation of cellular interaction provides a bottom-up approach to problem formulation, where the human architect defines rules of interaction among elementary architectural objects; the application of these rules triggers successive construction of objects of increasing complexity, which results in potential solutions. As a consequence, the required complexity of a potential solution—which reflects the complexity of the problem formulation—emerges by an artificial embryogeny. This is consistent with important features of human design practice such as ad hoc combination of different knowledge domains, interactive decisions and incremental formulation of a design solution.

Simulation of natural evolution provides search methods

effective in solving problems of high computational complexity. Typically, a population of individuals representing potential solutions evolves as new high-fitness individuals, resulting from genetic operations applied to individuals of the population, replace lower-fitness individuals during successive computational cycles. «Genetic operations» are structure-altering operations, while «fitness» is a desirable quantitative property of the individuals. «Fitness» is to be maximized.

The design method presented in this paper is based on a general evolutionary problem-solving method implemented in the computer language GENETICA. The latter includes an evolutionary computational system incorporated in its programming environment. GENETICA is a highly expressive language as it includes both predicate logic and higher order modes of expression. Problems including either confirmation and/or optimization goals can be formally stated as GENETICA programs. Given the program, GENETICA's computational system evolves data generation scenarios aiming at solving the problem. The solution is represented as an evolved data structure. Due to its high expressiveness, GENETICA can be used as a platform for the development of domain-specific languages which inherit its computational system. G-CAD is a version of GENETICA specialized in the domain of architectural design. A problem formulation in G-CAD is based on the following tenets:

- general knowledge representation based on both predicate logic and higher order modes of expression
- knowledge encapsulation in objects
- objects having environment-content relationship
- object-to-object interactions triggering selfassembly procedures

The last two tenets make possible an artificial embryogeny, within the framework of simulation of cellular interactions. This will be illustrated in the following case study, which concerns an architectural design problem.

2. FORMULATION AND SOLUTION OF AN ARCHITECTURAL DESIGN PROBLEM

Primitive G-CAD objects are rectangles positioned on the Cartesian Plane. Each rectangle represents a part of the plan of an elementary architectural object. Rectangles have both spatial and logical attributes, while their dimensions are either fixed or constrained. Both attributes and dimension specifications are defined by atomic G-CAD formulas. An elementary architectural object is an assembly of rectangles, which may include graphic attributes. For instance, consider the elementary architectural objects presented in Figure 1. They are assemblies of rectangles having the spatial attributes *PS* (Physical Space), *FS* (Functional Space), *IS* (Internal Space), *ES* (External Space) and *WIS* (Window Internal Space). Logical attributes, encapsulated in objects' descriptions, specify that overlapping between a *PS* rectangle of any object and any rectangle of any other object is not allowed. These attributes specify elementary object-to-object interactions which trigger the first phase of the embryogeny. Graphic attributes represent objects as architectural drawings.

G-CAD non atomic formulas specify composite objects. They are constructed by either logical connectives, or quantifiers, or special connectives denoting either conditional recursion or optimization. These formulas include specifications for positioning objects within another object, the latter viewed as an environment. Such specifications represent advanced phases of the embryogeny, which allow inductive development a of solution's complexity. Decisions not deterministically defined by the specifications are evolved by GENETICA's computational system in an attempt to confirm the non-atomic formula—where confirmation results in the production of the composite object—and potentially to optimize a specific quantitative property of the composite object. For instance, consider the object presented in Figure 2. It consists of three rectangles having the spatial attributes *MR* (Main Room), *WC* (Water Closet) and *COR* (Corridor), subjected to the geometric constraint $A + B = C + D$. This object is described by the non atomic formula *Apartment* which also includes specifications for positioning elementary objects within the initial object. Specifications, having the form of logical attributes, state that a *Wardrobe* instance (Figure 1), two *Bed* instances and an instance of either *Sitting_Group_1* or *Sitting_Group_2* should be placed in the *MR* region, a *Toilet*, a *Basin* and a *Shower* instance should be placed in the *WC* region, two *Door* instances should be placed at the *COR-MR* and *MR-WC* boundaries, while a *Balcony_Door* and a *WC_Window* instance should be placed on the exterior boundary of the *MR* and the *WC* regions. Different evolved versions of the composite object, all confirming the formula *Apartment*, are presented in Figure 3, having the form of architectural drawings. This form is achieved through a CAD interface

which uses the graphic attributes of elementary objects.

The solution emerges as a high-complexity object, specified by a non atomic formula which refers to composite objects. This is the final phase of the embryogeny, which concludes the inductive developmental process. Consider the non atomic formula *Hotel* which describes a “hotel” object including eight instances of the “apartment” (the composite object described by the non atomic formula *Apartment*) and also a *Stairwell* instance (Figure 1). Logical attributes of the “hotel” object represent the “apartment” combination rules presented in Figure 4, while they only allow *COR-to-COR* overlaps between different “apartments”. The formula *Hotel* also requires minimization of the area of the total (*MR* or *WC* or *COR*) region of the “hotel”. Successive phases of the “hotel's” evolution are presented in Figure 5 in the form of architectural drawings. The hotel design problem, represented as a G-CAD program, includes only descriptions of low-complexity objects and simple object-to-object interaction rules. Nevertheless, it is a complex problem combining both confirmation and optimization goals in three interdependent design levels: the elementary objects level, the apartment level and the hotel level. The G-CAD program does not include any solution method. The solution method is problem-independent and is provided exclusively by GENETICA's evolutionary computational system.

A visualization of the evolutionary computational process is presented in Figure 6 as a diagram where the horizontal axis represents time in computational cycles. The textured area represents «species'» evolution, where a «species» is a set of identical data generation scenarios. “Species” are represented by grayscale zones ordered by increasing fitness from the bottom to the top of the diagram. The thickness of each zone represents the size of the respective «species». New best-fitness “species” appear at the top of the diagram while extinction takes place at the bottom. The best fitness reached in each computational cycle is represented by a black line. The ratio of «species» introduced in the population, in each computational cycle, to all new «species» generated during the computational cycle, is represented by a gray line.

Detailed documentation of both GENETICA and G-CAD is available at www.genetica-informatics.org. An executable prototype version of GENETICA is also available on the same website.

3. TOWARDS A NEW GENERATION OF CAD APPLICATIONS

Simulation of cellular interactions and artificial embryogeny can effectively support creative design on the computer. Necessary expressive and computational resources are provided by the language GENETICA which combines general formal expression with an evolutionary problem-solving method. The proposed approach can be adopted

for the development of a new generation of creative CAD systems in the domain of architectural design. This can be achieved by both the generalization of conventional object-oriented systems and the development of adaptive systems. In both cases, interactive design entities are subjected to problem-solving formulations characterized by a search space P and an either logical or numerical objective function f defined on P . A formal outline of such formulations is given here:

a) Generalization of object-oriented CAD systems

A conventional CAD object can be viewed as a mapping from a set A of vectors of user-defined attributes to a set I of object instances. A generalized CAD object can be viewed as a pair (g, f) , where g is a map from A into the powerset $\wp(I)$ of I , and f is a function defined on I : if $a \xrightarrow{g} P$ ($a \in A, P \in \wp(I)$) then P represents the search space of a problem whose potential solutions are defined by the attributes a .

b) Development of adaptive CAD systems

Consider E, S, A and EXT as sets of vector functions of time, where each function is defined on $T = [0, tmax]$.

If $(e, s, a, ext) \in E \times S \times A \times EXT$ then the functions e, s, a and ext respectively represent the state of the environment of a design entity (the latter potentially constituting a system of entities), the state of the entity, the influence of the entity on the environment, and external influences on the environment. The relations $(a(t), s'(t)) = b(e(t), s(t))$ (1) and $e'(t) = g(a(t), ext(t))$ [$t \in T$] (2) hold, where b and g describe the behavior of the entity and of the environment respectively. Consider g to be fixed, while $b \in B$, where B is a set of potential behaviors of the entity. Each element of the set $D = \{(e(0), ext): (e, ext) \in E \times EXT\}$ represents both an initial state of the environment and a scenario of external influences, while each element of the set $P = \{(s(0), b): (s, b) \in S \times B\}$ represents both an initial state and a potential behavior of the entity. Due to the relations (1) and (2), each element of P maps D into $E \times S$, where the latter includes potential scenarios of evolution of the system entity-environment in T . As a consequence, desirable features of such scenarios can be represented by a function f defined on P .