



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

CORE DEPARTMENT

MSc THESIS

**Supervisor Control in a cyber-physical system for vehicle flow in
the presence of actuators and sensors faults**

Efterpi Maria Spanelli

Supervisor:

Fotis N. Koumboulis, Professor

JULY 2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»
«Advanced Control Systems and Robotics»

«Εποπτικός Έλεγχος σε κυβερνοφυσικό σύστημα ροής
οχημάτων με παρουσία σφαλμάτων των ενεργοποιητών και
αισθητήρων του συστήματος»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Προηγμένα Συστήματα
Ελέγχου και Ρομποτικής» του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών ως
μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στα
Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής

από την

Ευτέρπη Μαρία Σπανέλλη

Ιούλιος 2024

«Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Συνέλευση του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του ΠΜΣ «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής». Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

1. Φώτιος Ν. Κουμπουλής, Καθηγητής(Επιβλέπων)
2. Νικόλαος Δ. Κούβακας, Αναπληρωτής Καθηγητής..... (Μέλος)
3. Δημήτριος Γ. Φραγκούλης, Επίκουρος Καθηγητής..... (Μέλος)

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Σύμφωνα με τον Ν. 4589/2019 (ΦΕΚ 13/29-1-2019 τ. Α) το Π.Μ.Σ. «Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής» εντάχθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.»

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα **Copyright**

«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο της ροής των αυτοκινήτων της γέφυρας Algera της Ολλανδίας. Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερις λωρίδες κίνησης, δύο για τα οχήματα, μία για το ποδήλατα και μία για τους πεζούς. Θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων των ενεργοποιητών και των αισθητήρων με και χωρίς την παρουσία σφαλμάτων. Θα αναπτυχθεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα παρουσιαστούν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας. Θα παρουσιαστούν οι προδιαγραφές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Θα διερευνηθούν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Θα διερευνηθεί η δυνατότητα σχεδιασμού μίας δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική εποπτικού ελέγχου.

Λέξεις κλειδιά: Πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα, Κυβερνοφυσικά συστήματα, Εποπτικός Έλεγχος, Σφάλματα ενεργοποιητών, Σφάλματα αισθητήρων.

Abstract

In this thesis, the mathematical model of the car flow of the Algra bridge in the Netherlands will be presented. The bridge consists of four traffic lanes, two for vehicles, one for bicycles and one for pedestrians. The mathematical models of the actuators and sensors subsystems with and without the presence of faults will be presented. The overall system model will be developed. All operating and safety specifications will be presented. The specifications will be presented in the desired regular languages. The properties of the desired languages in terms of the overall automaton of the system will be investigated. The possibility of designing a modular supervisory control architecture will be explored.

Keywords: Finite Deterministic Automata, Cyber-Physical systems, Supervisory Control, Actuator Faults, Sensor Faults.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΒΕΡΝΟΦΥΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ALGERA..... | 3 |
| 2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 3 |
| 2.1.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη αυτοκινήτων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 3 |
| 2.1.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη αυτοκινήτων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 4 |
| 2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΠΑΡΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 6 |
| 2.2.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 6 |
| 2.2.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 7 |
| 2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 9 |
| 2.3.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της γέφυρας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων..... | 9 |
| 2.3.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της γέφυρας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 10 |
| 2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗ ΠΛΟΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 12 |
| 2.4.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη πλοίων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων | 12 |
| 2.4.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη πλοίων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων..... | 14 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΒΕΡΝΟΦΥΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ALGERA ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ..... | 16 |
| 3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 16 |
| 3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ | 17 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ..... | 20 |

| | |
|--|--|
| 4.1 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ | 20 |
| 4.2 ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ | 20 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΟΠΤΩΝ..... | 22 |
| 5.1 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,1}$ | 22 |
| 5.2 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,2}$ | 23 |
| 5.3 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,3}$ | 24 |
| 5.4 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,4}$ | 25 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 27 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή του σηματοδότη | 4 |
| Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του σηματοδότη..... | 6 |
| Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της μπάρας κυκλοφορίας | 7 |
| Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα της μπάρας κυκλοφορίας... | 9 |
| Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της γέφυρας..... | 10 |
| Σχήμα 6: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα της γέφυρα..... | 12 |
| Σχήμα 7: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της μπάρας κυκλοφορίας | 14 |
| Σχήμα 8: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του σηματοδότη πλοίων .. | 15 |
| Σχήμα 9: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου των σφαλμάτων | 17 |
| Σχήμα 10: Το αυτόματο του επόπτη S_1 | 23 |
| Σχήμα 11: Το αυτόματο του επόπτη S_2 | 24 |
| Σχήμα 12: Το αυτόματο του επόπτη S_3 | 25 |
| Σχήμα 13: Το αυτόματο του επόπτη S_4 | 26 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο της ροής των αυτοκινήτων της γέφυρας Algera της Ολλανδίας. Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερις λωρίδες κίνησης, δύο για τα οχήματα, μία για το ποδήλατα και μία για τους πεζούς. Θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων των ενεργοποιητών και των αισθητήρων με και χωρίς την παρουσία σφαλμάτων. Θα αναπτυχθεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα παρουσιαστούν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας. Θα παρουσιαστούν οι προδιαγραφές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Θα διερευνηθούν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Θα διερευνηθεί η δυνατότητα σχεδιασμού μίας δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική εποπτικού ελέγχου.

Τα κυβερνοφυσικά συστήματα έχουν γίνει ολοένα και πιο περίπλοκα λόγω της αύξησης των απαιτήσεων ασφάλειας και της απαιτούμενης λειτουργικότητας. Οι ελεγκτές για αυτά τα συστήματα γίνονται επίσης όλο και πιο περίπλοκοι. (βλ. εργασίες [1]-[2]). Στην εργασία [2] παρουσιάζεται η επιθυμητή συμπεριφορά στη μορφή λογικών προτάσεων με και χωρίς την παρουσία σφαλμάτων. Επίσης στην εργασία [2] δεν αποδεικνύεται η πραγματοποιησιμότητα των εποπτών καθώς και η αποφυγή του εγκλωβισμού στο ελεγχόμενο σύστημα. Η αναλυτική παρουσίαση των κανονικών γλωσσών που αντιστοιχούν στις επιθυμητές συμπεριφορές και η αρχιτεκτονική ελέγχου που θα επιτρέψει την υλοποίηση των επιθυμητών προδιαγραφών με ταυτόχρονα την αποφυγή του εγκλωβισμού του ελεγχόμενου συστήματος είναι υπό διερεύνηση (βλ. εργασίες [3]-[4]).

Η μοντελοποίηση των συστημάτων θα πραγματοποιηθεί με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων καθώς με χρήση των πολυμελών πράξεων μεταξύ των αυτόματων ([1]-[21]). Η επιθυμητές συμπεριφορές θα προσδιοριστούν σε μορφή επιθυμητών γλωσσών. Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών που βασίζονται στις επιμέρους επιθυμητές γλώσσες. Θα μελετηθούν οι ιδιότητες των γλωσσών ώστε να ικανοποιούνται ικανές συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος του δομοστοιχειωτού ελέγχου ([18]-[57]). Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών ([32]-[57]).

Η αναλυτική περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο χωρίς την παρουσία σφαλμάτων.

Στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο με παρουσία σφαλμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστεί η επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος και οι κανονικές γλώσσες

Στο Κεφάλαιο 5 θα σχεδιαστούν οι επόπτες του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΒΕΡΝΟΦΥΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ALGERA

Η λίστα I/O της γέφυρας Algera έχει χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό του μοντέλου της εγκατάστασης. Τέσσερις διαφορετικοί τύποι μοντέλων συσκευών αποτελούν τη γέφυρα: 14 σηματοδότες κυκλοφορίας αυτοκινήτων, 6 μπάρες ελέγχου κυκλοφορίας, 1 γέφυρα και 4 σηματοδότες κυκλοφορίας πλοίων.

2.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Οι σηματοδότες αποτελούνται από μια είσοδο για να ενεργοποιηθεί το σήμα και μια έξοδο που λειτουργεί ως σήμα ανάδρασης. Αρχικά, ο σηματοδότης είναι απενεργοποιημένος, η οποία είναι και επιθυμητή λειτουργία (κατάσταση) Η ονομαστική συμπεριφορά είναι τέτοια που ο αισθητήρας θα ενεργοποιείται ή θα απενεργοποιείται μόνο όταν το σήμα είναι ενεργοποιημένο ή απενεργοποιημένο, αντίστοιχα.

2.1.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη αυτοκινήτων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{TA} = (\mathbb{Q}_{TA}, \mathbb{E}_{TA}, f_{TA}, \mathbb{H}_{TA}, x_{TA,0}, \mathbb{Q}_{TA,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{TA} = \{q_{TA,1}, q_{TA,2}\}$$

Η κατάσταση $q_{TA,1}$ είναι όταν ο ενεργοποιητής είναι απενεργοποιημένος (OFF). Η κατάσταση $q_{TA,2}$ είναι όταν ο ενεργοποιητής είναι ενεργοποιημένος (ON).

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{TA} = \{e_{TA,1}, e_{TA,2}\}$$

Το συμβάν $e_{TA,1}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ενεργοποιηθεί. Το συμβάν $e_{TA,2}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να απενεργοποιηθεί.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{TA}(q_{TA,1}, e_{TA,1}) = q_{TA,2} \text{ και } f_{TA}(q_{TA,2}, e_{TA,2}) = q_{TA,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{TA}(q_{TA,1}) = \{e_{TA,1}\} \text{ και } \mathbb{H}_{TA}(q_{TA,2}) = \{e_{TA,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{TA,0} = q_{TA,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{TA,m} = \{q_{TA,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{TA,c} = \{e_{TA,1}, e_{TA,2}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{TA,uc} = \emptyset$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{TA}) = \overline{(e_{TA,1}e_{TA,2})^*}$$

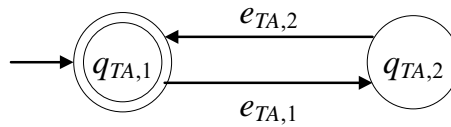
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{TA}) = (e_{TA,1}e_{TA,2})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{TA})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{TA}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή του σηματοδότη

2.1.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη αυτοκινήτων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{TS} = (\mathbb{Q}_{TS}, \mathbb{E}_{TS}, f_{TS}, \mathbb{H}_{TS}, x_{TS,0}, \mathbb{Q}_{TS,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{TS} = \{q_{TS,1}, q_{TS,2}\}$$

Η κατάσταση $q_{TS,1}$ είναι όταν ο αισθητήρας είναι απενεργοποιημένος (OFF). Η κατάσταση $q_{TS,2}$ είναι όταν ο αισθητήρας είναι ενεργοποιημένος (ON).

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{TS} = \{e_{TS,1}, e_{TS,2}\}$$

Το συμβάν $e_{TS,1}$ είναι το σήμα στον αισθητήρα να απενεργοποιηθεί. Το συμβάν $e_{TS,2}$ είναι το σήμα στον αισθητήρα να ενεργοποιηθεί.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{TS}(q_{TS,1}, e_{TS,1}) = q_{TS,2} \text{ και } f_{TS}(q_{TS,2}, e_{TS,2}) = q_{TS,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{TS}(q_{TS,1}) = \{e_{TS,1}\} \text{ και } \mathbb{H}_{TS}(q_{TS,2}) = \{e_{TS,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{TS,0} = q_{TS,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{TS,m} = \{q_{TS,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{TS,c} = \emptyset$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{TS,uc} = \{e_{TS,1}, e_{TS,2}\}$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{TS}) = \overline{(e_{TS,1}e_{TS,2})^*}$$

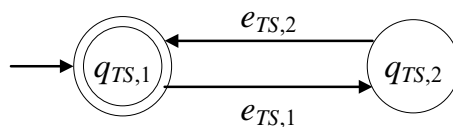
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{TS}) = (e_{TS,1}e_{TS,2})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{TS})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{TS}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του σηματοδότη

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΠΑΡΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

2.2.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{BA} = (\mathbb{Q}_{BA}, \mathbb{E}_{BA}, f_{BA}, \mathbb{H}_{BA}, x_{BA,0}, \mathbb{Q}_{BA,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{BA} = \{q_{BA,1}, q_{BA,2}, q_{BA,3}\}$$

Η κατάσταση $q_{BA,1}$ είναι όταν η μπάρα είναι ακίνητη. Η κατάσταση $q_{BA,2}$ είναι όταν η μπάρα είναι ανεβαίνει. Η κατάσταση $q_{BA,3}$ είναι όταν η μπάρα είναι κατεβαίνει.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{BA} = \{e_{BA,1}, e_{BA,2}, e_{BA,3}\}$$

Το συμβάν $e_{BA,1}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανεβάσει τη μπάρα. Το συμβάν $e_{BA,2}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να κατεβάσει τη μπάρα. Το συμβάν $e_{BA,3}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να σταματήσει την κίνηση της μπάρας.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{BA}(q_{BA,1}, e_{BA,1}) = q_{BA,2}, \quad f_{BA}(q_{BA,1}, e_{BA,2}) = q_{BA,3}$$

$$f_{BA}(q_{BA,2}, e_{BA,3}) = q_{BA,1}$$

$$\text{και } f_{BA}(q_{BA,3}, e_{BA,3}) = q_{BA,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{BA}(q_{BA,1}) = \{e_{BA,1}, e_{BA,2}\},$$

$$\mathbb{H}_{BA}(q_{BA,2}) = \{e_{BA,3}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{BA}(q_{BA,3}) = \{e_{BA,3}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{BA,0} = q_{BA,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{BA,m} = \{q_{BA,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{BA,c} = \{e_{BA,1}, e_{BA,2}, e_{BA,3}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{BA,uc} = \emptyset$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{BA}) = \overline{(e_{BA,1}e_{BA,3} + e_{BA,2}e_{BA,3})^*}$$

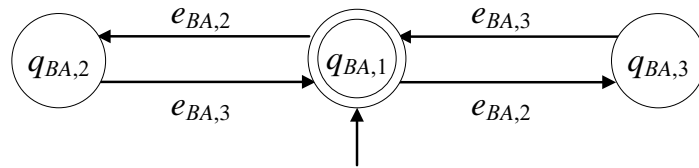
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{BA}) = (e_{BA,1}e_{BA,3} + e_{BA,2}e_{BA,3})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{BA})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{BA}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της μπάρας κυκλοφορίας

2.2.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της μπάρας ελέγχου κυκλοφορίας [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{BS} = (\mathbb{Q}_{BS}, \mathbb{E}_{BS}, f_{BS}, \mathbb{H}_{BS}, x_{BS,0}, \mathbb{Q}_{BS,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{BS} = \{q_{BS,1}, q_{BS,2}, q_{BS,3}\}$$

Η κατάσταση $q_{BS,1}$ είναι όταν η μπάρα είναι ανοικτή. Η κατάσταση $q_{BS,2}$ είναι όταν η μπάρα είναι μεταξύ ανοικτής και κλειστής. Η κατάσταση $q_{BS,3}$ είναι όταν η μπάρα είναι κλειστή.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{BS} = \{e_{BS,1}, e_{BS,2}, e_{BS,3}, e_{BS,4}\}$$

Το συμβάν $e_{BS,1}$ είναι το σήμα ότι η μπάρα δεν είναι ανοικτή. Το συμβάν $e_{BS,2}$ είναι το σήμα ότι η μπάρα είναι ανοικτή. Το συμβάν $e_{BS,3}$ είναι το σήμα ότι η μπάρα είναι κλειστή. Το συμβάν $e_{BS,4}$ είναι το σήμα ότι η μπάρα δεν είναι κλειστή.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{BS}(q_{BS,1}, e_{BS,1}) = q_{BS,2},$$

$$f_{BS}(q_{BS,2}, e_{BS,2}) = q_{BS,1}$$

$$f_{BS}(q_{BS,2}, e_{BS,3}) = q_{BS,3} \text{ και } f_{BS}(q_{BS,3}, e_{BS,4}) = q_{BS,2}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{BS}(q_{BS,1}) = \{e_{BS,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{BS}(q_{BS,2}) = \{e_{BS,2}, e_{BS,3}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{BS}(q_{BS,3}) = \{e_{BS,4}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{BS,0} = q_{BS,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{BS,m} = \{q_{BS,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{BS,c} = \emptyset$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{BS,uc} = \{e_{BS,1}, e_{BS,2}, e_{BS,3}, e_{BS,4}\}$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{BS}) = \overline{\left(e_{BS,1} \left(e_{BS,2} + (e_{BS,3} e_{BA,4})^* \right) \right)^*}$$

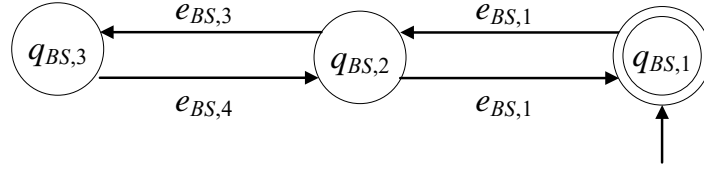
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{BS}) = \left(e_{BS,1} \left(e_{BS,2} + (e_{BS,3} e_{BA,4})^* \right) \right)^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{BS})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{BS}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα της μπάρας κυκλοφορίας

2.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

2.3.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της γέφυρας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή της γέφυρας [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{DA} = (\mathbb{Q}_{DA}, \mathbb{E}_{DA}, f_{DA}, \mathbb{H}_{DA}, x_{DA,0}, \mathbb{Q}_{DA,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{DA} = \{q_{DA,1}, q_{DA,2}, q_{DA,3}\}$$

Η κατάσταση $q_{DA,1}$ είναι όταν η γέφυρα είναι ακίνητη. Η κατάσταση $q_{DA,2}$ είναι όταν η γέφυρα είναι ανεβαίνει. Η κατάσταση $q_{DA,3}$ είναι όταν η γέφυρα είναι κατεβαίνει.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{DA} = \{e_{DA,1}, e_{DA,2}, e_{DA,3}\}$$

Το συμβάν $e_{DA,1}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανεβάσει τη γέφυρα. Το συμβάν $e_{DA,2}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να κατεβάσει τη γέφυρα. Το συμβάν $e_{DA,3}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να σταματήσει την κίνηση της γέφυρας.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{DA}(q_{DA,1}, e_{DA,1}) = q_{DA,2},$$

$$f_{DA}(q_{DA,1}, e_{DA,2}) = q_{DA,3}$$

$$f_{DA}(q_{DA,2}, e_{DA,3}) = q_{DA,1}$$

$$\text{και } f_{DA}(q_{DA,3}, e_{DA,3}) = q_{DA,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{DA}(q_{DA,1}) = \{e_{DA,1}, e_{DA,2}\},$$

$$\mathbb{H}_{DA}(q_{DA,2}) = \{e_{DA,3}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{DA}(q_{DA,3}) = \{e_{DA,3}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{DA,0} = q_{DA,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{DA,m} = \{q_{DA,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{DA,c} = \{e_{DA,1}, e_{DA,2}, e_{DA,3}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{DA,uc} = \emptyset$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{DA}) = \overline{(e_{DA,1}e_{DA,3} + e_{DA,2}e_{DA,3})^*}$$

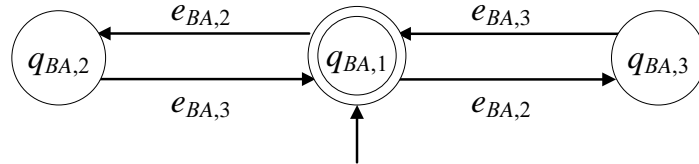
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{DA}) = (e_{DA,1}e_{DA,3} + e_{DA,2}e_{DA,3})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{DA})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{DA}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της γέφυρας

2.3.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της γέφυρας χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα της γέφυρας [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{DS} = (\mathbb{Q}_{DS}, \mathbb{E}_{DS}, f_{DS}, \mathbb{H}_{DS}, x_{DS,0}, \mathbb{Q}_{DS,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{DS} = \{q_{DS,1}, q_{DS,2}, q_{DS,3}\}$$

Η κατάσταση $q_{DS,1}$ είναι όταν η γέφυρα είναι ανοικτή. Η κατάσταση $q_{DS,2}$ είναι όταν η γέφυρα είναι μεταξύ ανοικτής και κλειστής. Η κατάσταση $q_{DS,3}$ είναι όταν η γέφυρα είναι κλειστή.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{DS} = \{e_{DS,1}, e_{DS,2}, e_{DS,3}, e_{DS,4}\}$$

Το συμβάν $e_{DS,1}$ είναι το σήμα ότι η γέφυρα δεν είναι ανοικτή. Το συμβάν $e_{DS,2}$ είναι το σήμα ότι η γέφυρα είναι ανοικτή. Το συμβάν $e_{DS,3}$ είναι το σήμα ότι η γέφυρα είναι κλειστή. Το συμβάν $e_{DS,4}$ είναι το σήμα ότι η γέφυρα δεν είναι κλειστή.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{DS}(q_{DS,1}, e_{DS,1}) = q_{DS,2},$$

$$f_{DS}(q_{DS,2}, e_{DS,2}) = q_{DS,1}$$

$$f_{DS}(q_{DS,2}, e_{DS,3}) = q_{DS,3}$$

$$\text{και } f_{DS}(q_{DS,3}, e_{DS,4}) = q_{DS,2}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{DS}(q_{DS,1}) = \{e_{DS,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{DS}(q_{DS,2}) = \{e_{DS,2}, e_{DS,3}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{DS}(q_{DS,3}) = \{e_{DS,4}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{DS,0} = q_{DS,3}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{DS,m} = \{q_{DS,3}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{DS,c} = \emptyset$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{DS,uc} = \{e_{DS,1}, e_{DS,2}, e_{DS,3}, e_{DS,4}\}$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{DS}) = \overline{\left(e_{DS,1} \left(e_{DS,2} + (e_{DS,3} e_{DS,4})^* \right)^* \right)^*}$$

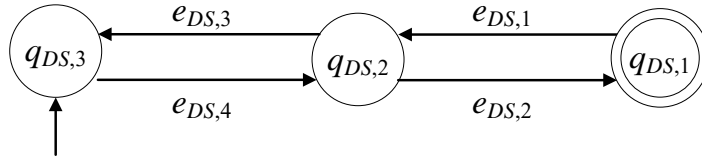
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{DS}) = \left(e_{DS,1} \left(e_{DS,2} + (e_{DS,3} e_{DS,4})^* \right)^* \right)^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{DS})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{DS}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα της γέφυρα

2.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗ ΠΛΟΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

2.4.1 Μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη πλοίων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη πλοίων [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{VA} = (\mathbb{Q}_{VA}, \mathbb{E}_{VA}, f_{VA}, \mathbb{H}_{VA}, x_{VA,0}, \mathbb{Q}_{VA,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{VA} = \{q_{VA,1}, q_{VA,2}, q_{VA,3}, q_{VA,4}\}$$

Η κατάσταση $q_{VA,1}$ είναι όταν ο σηματοδότης είναι στο κόκκινο. Η κατάσταση $q_{VA,2}$ είναι όταν ο σηματοδότης είναι στο κόκκινο-κόκκινο. Η κατάσταση $q_{VA,3}$ είναι όταν ο σηματοδότης είναι στο κόκκινο- πράσινο. Η κατάσταση $q_{VA,4}$ είναι όταν ο σηματοδότης είναι στο πράσινο.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{VA} = \{e_{VA,1}, e_{VA,2}, e_{VA,3}, e_{VA,4}\}$$

Το συμβάν $e_{VA,1}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανάψει το κόκκινο-κόκκινο. Το συμβάν $e_{VA,2}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανάψει το κόκκινο. Το συμβάν $e_{VA,3}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανάψει το κόκκινο-πράσινο. Το συμβάν $e_{VA,4}$ είναι η εντολή στον ενεργοποιητή να ανάψει το πράσινο.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{VA}(q_{VA,1}, e_{VA,1}) = q_{VA,2},$$

$$f_{VA}(q_{VA,1}, e_{VA,3}) = q_{VA,3},$$

$$f_{VA}(q_{VA,2}, e_{VA,2}) = q_{VA,1},$$

$$f_{VA}(q_{VA,3}, e_{VA,2}) = q_{VA,1},$$

$$f_{VA}(q_{VA,3}, e_{VA,4}) = q_{VA,4}$$

$$\text{και } f_{VA}(q_{VA,4}, e_{VA,2}) = q_{VA,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{VA}(q_{VA,1}) = \{e_{VA,1}, e_{VA,3}\},$$

$$\mathbb{H}_{VA}(q_{VA,2}) = \{e_{VA,2}\},$$

$$\mathbb{H}_{VA}(q_{VA,3}) = \{e_{VA,2}, e_{VA,4}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{VA}(q_{VA,4}) = \{e_{VA,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{VA,0} = q_{VA,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{VA,m} = \{q_{VA,1}, q_{VA,2}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{VA,c} = \{e_{VA,1}, e_{VA,2}, e_{VA,3}, e_{VA,4}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{VA,uc} = \emptyset$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{VA}) = \overline{\left((e_{VA,1}e_{VA,2})^* e_{VA,3} (e_{VA,1} + e_{VA,4}e_{VA,1}) \right)^*}$$

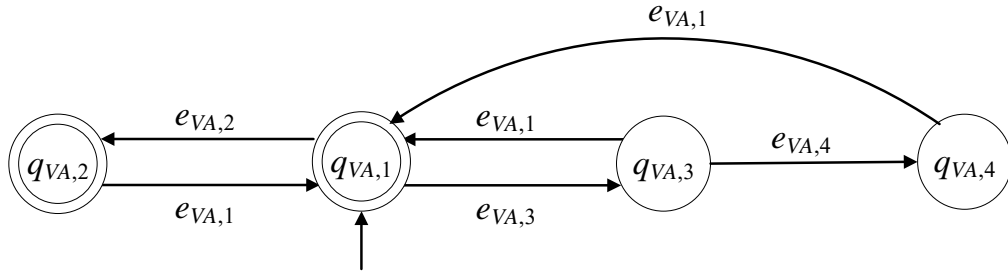
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{VA}) = \left((e_{VA,1}e_{VA,2})^* e_{VA,3} (e_{VA,1} + e_{VA,4}e_{VA,1}) \right)^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{VA})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{VA}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ενεργοποιητή της μπάρας κυκλοφορίας

2.4.2 Μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη πλοίων χωρίς την παρουσία σφαλμάτων

Το μαθηματικό μοντέλο του αισθητήρα του σηματοδότη πλοίων [1] με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([5]-[11]) είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{VS} = (\mathbb{Q}_{VS}, \mathbb{E}_{VS}, f_{VS}, \mathbb{H}_{VS}, x_{VS,0}, \mathbb{Q}_{VS,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{VS} = \{q_{VS,1}, q_{VS,2}\}$$

Η κατάσταση $q_{VS,1}$ είναι όταν ο αισθητήρας είναι απενεργοποιημένος (OFF). Η κατάσταση $q_{VS,2}$ είναι όταν ο αισθητήρας είναι ενεργοποιημένος (ON).

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{VS} = \{e_{VS,1}, e_{VS,2}\}$$

Το συμβάν $e_{VS,1}$ είναι το σήμα στον αισθητήρα να απενεργοποιηθεί. Το συμβάν $e_{VS,2}$ είναι το σήμα στον αισθητήρα να ενεργοποιηθεί.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{VS}(q_{VS,1}, e_{VS,1}) = q_{VS,2}$$

$$\text{και } f_{VS}(q_{VS,2}, e_{VS,2}) = q_{VS,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{VS}(q_{VS,1}) = \{e_{VS,1}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_{VS}(q_{VS,2}) = \{e_{VS,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι $x_{VS,0} = q_{VS,1}$.

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι $\mathbb{Q}_{VS,m} = \{q_{VS,1}\}$.

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{VS,c} = \emptyset$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{VS,uc} = \{e_{VS,1}, e_{VS,2}\}$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_{VS}) = \overline{(e_{VS,1}e_{VS,2})^*}$$

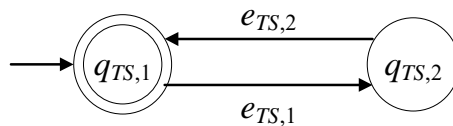
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{VS}) = (e_{VS,1}e_{VS,2})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{VS})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{VS}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του αισθητήρα του σηματοδότη πλοίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΒΕΡΝΟΦΥΣΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ALGERA ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Το μαθηματικό μοντέλο των σφαλμάτων είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_F = (\mathbb{Q}_F, \mathbb{E}_F, f_F, \mathbb{H}_F, x_{F,0}, \mathbb{Q}_{F,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_F = \{q_{F,1}, q_{F,2}\}$$

Η κατάσταση $q_{F,1}$ είναι όταν δεν υπάρχει σφάλμα στο σύστημα. Η κατάσταση $q_{F,2}$ είναι όταν υπάρχει σφάλμα στο σύστημα.

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_F = \{e_{F,1}, e_{F,2}\}$$

Το συμβάν $e_{F,1}$ είναι το σήμα ότι ένα σφάλμα έχει εντοπιστεί. Το συμβάν $e_{F,2}$ είναι το σήμα ότι το σφάλμα επιδιορθώθηκε.

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_F(q_{F,1}, e_{F,1}) = q_{F,2}$$

$$\text{και } f_F(q_{F,2}, e_{F,2}) = q_{F,1}$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_F(q_{F,1}) = \{e_{F,1}\}$$

$$\text{και } \mathbb{H}_F(q_{F,2}) = \{e_{F,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{F,0} = q_{F,1}.$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{F,m} = \{q_{F,1}\}.$$

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{F,c} = \emptyset$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{F,uc} = \{e_{F,1}, e_{F,2}\}$.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_F) = \overline{(e_{F,1}e_{F,2})}^*$$

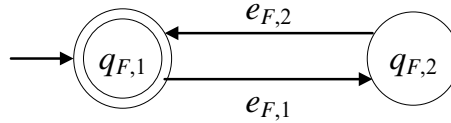
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_F) = (e_{F,1}e_{F,2})^*$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_F)} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_F).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου των σφαλμάτων

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Το μαθηματικά μοντέλα των συστημάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 σε συνδυασμό με το μαθηματικό μοντέλο του σφάλματος συνθέτουν το μαθηματικό μοντέλο των ενεργοποιητών και των αισθητήρων παρουσία σφαλμάτων. Έτσι τα μοντέλα είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{FTA} = \mathbf{G}_{TA} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FTS} = \mathbf{G}_{TS} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FBA} = \mathbf{G}_{BA} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FBS} = \mathbf{G}_{BS} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FDA} = \mathbf{G}_{DA} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FDS} = \mathbf{G}_{DS} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FVA} = \mathbf{G}_{VA} \parallel \mathbf{G}_F$$

$$\mathbf{G}_{FVS} = \mathbf{G}_{VS} \parallel \mathbf{G}_F$$

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ενδεικτικά το μοντέλο του ενεργοποιητή του σηματοδότη αυτοκινήτων. Το μαθηματικό μοντέλο είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{FTA} = (\mathbb{Q}_{FTA}, \mathbb{E}_{FTA}, f_{FTA}, \mathbb{H}_{FTA}, x_{FTA,0}, \mathbb{Q}_{FTA,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{FTA} = \{(q_{TA,1}, q_{F,1}), (q_{TA,1}, q_{F,2}), (q_{TA,2}, q_{F,1}), (q_{TA,2}, q_{F,2})\}$$

Το αλφάβητο του αυτόματου είναι

$$\mathbb{E}_{FTA} = \{e_{TA,1}, e_{TA,2}, e_{F,1}, e_{F,2}\}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης του αυτόματου είναι

$$f_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,1}), e_{TA,1}) = (q_{TA,2}, q_{F,1}),$$

$$f_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,1}), e_{F,1}) = (q_{TA,1}, q_{F,2})$$

$$f_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,1}), e_{TA,2}) = (q_{TA,1}, q_{F,1}),$$

$$f_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,1}), e_{F,1}) = (q_{TA,2}, q_{F,2})$$

$$f_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,2}), e_{TA,1}) = (q_{TA,2}, q_{F,2}),$$

$$f_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,2}), e_{F,2}) = (q_{TA,1}, q_{F,1})$$

$$f_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,2}), e_{TA,2}) = (q_{TA,1}, q_{F,2}),$$

$$f_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,2}), e_{F,2}) = (q_{TA,2}, q_{F,1})$$

Τα σύνολα των ενεργών συμβάντων του αυτόματου είναι

$$\mathbb{H}_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,1})) = \{e_{TA,1}, e_{F,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,1})) = \{e_{TA,2}, e_{F,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{FTA}((q_{TA,1}, q_{F,2})) = \{e_{TA,1}, e_{F,2}\},$$

$$\mathbb{H}_{FTA}((q_{TA,2}, q_{F,2})) = \{e_{TA,2}, e_{F,2}\}.$$

Η αρχική κατάσταση του αυτόματου είναι

$$x_{FTA,0} = (q_{TA,1}, q_{F,1}).$$

Οι σημαδεμένες καταστάσεις του αυτόματου είναι

$$\mathbb{Q}_{FTA,m} = (q_{TA,1}, q_{F,1}).$$

Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{FTA,c} = \{e_{TA,1}, e_{TA,2}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{FTA,uc} = \{e_{F,1}, e_{F,2}\}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

4.1 ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Στην [1] ένα σύνολο κανόνων για ορθή και ασφαλή λειτουργία έχει προταθεί όπου

1. Εάν δεν είναι ενεργοποιημένοι όλοι οι σηματοδότες, τα σήματα στοπ δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν.
2. Εάν δεν είναι ενεργοποιημένα όλα τα σήματα στοπ, οι μπάρες εισόδου δεν μπορούν να κλείσουν.
3. Εάν δεν είναι κλειστές όλες οι μπάρες εισόδου, οι μπάρες εξόδου δεν μπορούν να κλείσουν.
4. Εάν δεν είναι κλειστές όλες οι μπάρες, η γέφυρα δεν μπορεί να ανοίξει.

4.2 ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Για κάθε μία από τις παραπάνω προδιαγραφές θα αναπτυχθεί μία κανονική γλώσσα

Για την προδιαγραφή 1 ισχύει ότι

$$\mathbb{K}_{D,1,i} = \overline{(e_{TA,i,1}(e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1})^* e_{TA,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$\mathbb{K}_{D,1,i+6} = \overline{(e_{TS,i,1}(e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1})^* e_{TS,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Για την προδιαγραφή 2 ισχύει ότι

$$\mathbb{K}_{D,2,i} = \overline{(e_{BA,i,1}(e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1})^* e_{BA,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$\mathbb{K}_{D,2,i+6} = \overline{(e_{BS,i,1}(e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1})^* e_{BS,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Για την προδιαγραφή 3 ισχύει ότι

$$\mathbb{K}_{D,3,1} = \overline{(e_{BA,1,1}(e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1})^* e_{BA,1,2})^*}$$

$$\mathbb{K}_{D,3,2} = \overline{(e_{BS,1,1}(e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1})^* e_{BS,1,2})^*}$$

$$\mathbb{K}_{D,3,3} = \overline{(e_{BA,4,1}(e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1})^* e_{BA,4,2})^*}$$

$$\mathbb{K}_{D,3,4} = \overline{(e_{BS,4,1}(e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1})^* e_{BS,4,2})^*}$$

Για την προδιαγραφή 4 ισχύει ότι

$$\mathbb{K}_{D,4,i} = \overline{(e_{BA,i,1}(e_{DA,1})^* e_{BA,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$\mathbb{K}_{D,4,i+6} = \overline{(e_{BS,i,1}(e_{DA,1})^* e_{BS,i,2})^*}; i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

Οι υπόλοιπες γλώσσες κατασκευάζονται με όμοιο τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΟΠΤΩΝ

5.1 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,1}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,1}$ ο επόπτης είναι της μορφής ([5]-[11])

$$\mathbf{S}_1 = (\mathbb{Q}_{S,1}, \mathbb{E}_{S,1}, f_{S,1}, \mathbb{H}_{S,1}, x_{S,1,0}, \mathbb{Q}_{S,1,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,1} = \{q_{S,1,1}, q_{S,1,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,1} = \{e_{TA,i,1}, e_{TA,i,2}, e_{TA,7,2}, \dots, e_{TA,16,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι

$$x_{S,1,0} = q_{S,1,1}.$$

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_{S,1,m} = \mathbb{Q}_{S,1}.$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,1}(q_{S,1,1}, e_{TA,i,1}) = q_{S,1,2},$$

$$f_{S,1}(q_{S,1,2}, e) = q_{S,1,2}; e \in \{e_{TA,7,2}, \dots, e_{TA,16,2}\},$$

$$f_{S,1}(q_{S,1,2}, e_{TA,i,2}) = q_{S,1,1}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,1}) = \{e_{TA,i,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,2}) = \{e_{TA,i,2}, e_{TA,7,2}, \dots, e_{TA,16,2}\}$$

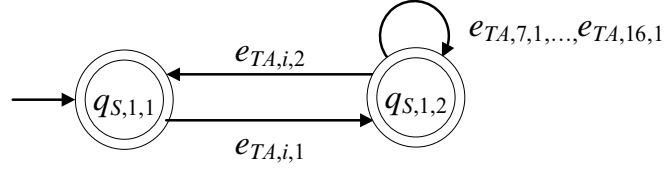
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_1) = \mathbb{K}_{D,1,i}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{S}_1) = \mathbb{K}_{D,1,i}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Το αυτόματο του επόπτη \mathbf{S}_1

5.2 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,2}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,2}$ ο επόπτης είναι της μορφής ([5]-[11])

$$\mathbf{S}_2 = (\mathbb{Q}_{S,2}, \mathbb{E}_{S,2}, f_{S,2}, \mathbb{H}_{S,2}, x_{S,2,0}, \mathbb{Q}_{S,2,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,2} = \{q_{S,2,1}, q_{S,2,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,2} = \{e_{BA,i,1}, e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1}, e_{BA,i,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι

$$x_{S,2,0} = q_{S,2,1}$$

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_{S,2,m} = \mathbb{Q}_{S,2}$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,2}(q_{S,2,1}, e_{BA,i,1}) = q_{S,2,2},$$

$$f_{S,2}(q_{S,2,2}, e) = q_{S,2,2}; e \in \{e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1}\},$$

$$f_{S,2}(q_{S,2,2}, e_{BA,i,2}) = q_{S,2,1}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,2}(q_{S,2,1}) = \{e_{BA,i,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{S,2}(q_{S,2,2}) = \{e_{TA,7,1}, \dots, e_{TA,16,1}, e_{BA,i,2}\}.$$

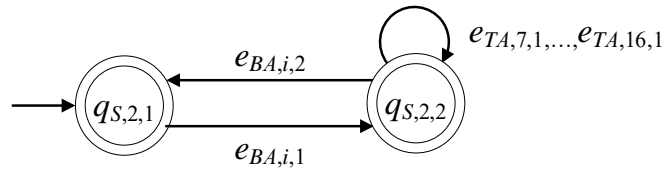
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(S_2) = \mathbb{K}_{D,2,i}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m(S_2) = \mathbb{K}_{D,2,i}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Το αυτόματο του επόπτη S_2

5.3 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,3}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,3}$ ο επόπτης είναι της μορφής ([5]-[11])

$$S_3 = (\mathbb{Q}_{S,3}, \mathbb{E}_{S,3}, f_{S,3}, \mathbb{H}_{S,3}, x_{S,3,0}, \mathbb{Q}_{S,3,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,3} = \{q_{S,3,1}, q_{S,3,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,3} = \{e_{BA,1,1}, e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1}, e_{BA,1,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι

$$x_{S,3,0} = q_{S,3,1}.$$

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι

$$\mathbb{Q}_{S,3,m} = \mathbb{Q}_{S,3}.$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,3}(q_{S,3,1}, e_{BA,1,1}) = q_{S,3,2},$$

$$f_{S,3}(q_{S,3,2}, e_{BA,2,1}) = q_{S,3,2},$$

$$f_{S,3}(q_{S,3,2}, e_{BA,3,1}) = q_{S,3,2}$$

$$f_{S,3}(q_{S,3,2}, e_{BA,1,2}) = q_{S,3,1}$$

Το σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,3}(q_{S,3,1}) = \{e_{BA,1,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{S,3}(q_{S,3,2}) = \{e_{BA,2,1}, e_{BA,3,1}, e_{BA,1,2}\}.$$

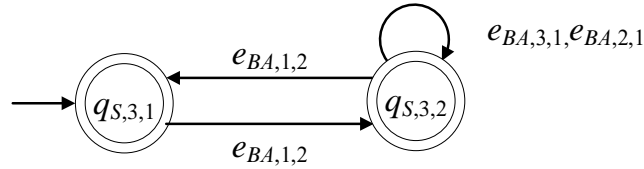
Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(S_3) = \mathbb{K}_{D,3,i}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m(S_3) = \mathbb{K}_{D,3,i}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Το αυτόματο του επόπτη S_3

5.4 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,4}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,4}$ ο επόπτης είναι της μορφής ([5]-[11])

$$S_4 = (\mathbb{Q}_{S,4}, \mathbb{E}_{S,4}, f_{S,4}, \mathbb{H}_{S,4}, x_{S,4,0}, \mathbb{Q}_{S,4,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,4} = \{q_{S,4,1}, q_{S,4,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,4} = \{e_{BA,i,1}, e_{DA,1}, e_{BA,i,2}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι

$$x_{S,4,0} = q_{S,4,1}.$$

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι

$$Q_{S,4,m} = Q_{S,4}.$$

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,4}(q_{S,4,1}, e_{BA,i,1}) = q_{S,4,2},$$

$$f_{S,4}(q_{S,4,2}, e_{DA,1}) = q_{S,4,2},$$

$$\text{και } f_{S,4}(q_{S,4,2}, e_{BA,i,2}) = q_{S,4,1}$$

Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,4}(q_{S,4,1}) = \{e_{BA,i,1}\},$$

$$\mathbb{H}_{S,4}(q_{S,4,2}) = \{e_{DA,1}, e_{BA,i,2}\}.$$

Η γλώσσα που παράγει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_4) = \mathbb{K}_{D,4}$$

Τέλος η γλώσσα που σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{S}_4) = \mathbb{K}_{D,4}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Το αυτόματο του επόπτη \mathbf{S}_4

Οι υπόλοιποι επόπτες κατασκευάζονται με όμοιο τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο της ροής των αυτοκινήτων της γέφυρας Algera της Ολλανδίας. Η γέφυρα αποτελείται από τέσσερις λωρίδες κίνησης, δύο για τα οχήματα, μία για το ποδήλατα και μία για τους πεζούς. Παρουσιάστηκαν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων των ενεργοποιητών και των αισθητήρων με και χωρίς την παρουσία σφαλμάτων. Αναπτύχθηκε το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Παρουσιάστηκαν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας. Θ Παρουσιάστηκαν οι προδιαγραφές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Σχεδιάστηκε μίας δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική εποπτικού ελέγχου.

REFERENCES

1. F. F. H. Reijnen, M. A. Goorden, J. M. van de Mortel-Fronczak and J. E. Rooda, "Supervisory control synthesis for a waterway lock," *InCCTA*, pp. 1562–1568, IEEE, 2017.
2. F. F. H. Reijnen, M. A. Reniers, J. M. van de Mortel-Fronczak and J. E. Rooda, "Structured Synthesis of Fault-Tolerant Supervisory Controllers," *IFAC-PapersOnLine*, vol 51(24), pp. 894-901, 2018.
3. C. G. Casandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
4. W. M. Wonham and C. Kai, *Supervisory control of discrete-event systems*, Springer International Publishing, 2019.
5. F. F. H. Reijnen, M. A. Goorden, J. M. van de Mortel-Fronczak, and J. E. Rooda, "Modeling for supervisor synthesis—a lock-bridge combination case study," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 30(3), pp. 499–532, 2020.
6. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and S. Arapakis, "Supervisor design for an assembly line in the presence of faults," *27th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation*, Stuttgart, September 6-9, Germany, 2022.
7. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, I. Kalkanias, and G. F. Fragulis, "Supervisor Design for a Pressurized Reactor Unit in the Presence of Sensor and Actuator Faults," *Electronics*, vol. 11(16), p. 2534, 2022.
8. M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, and J. Schroder, *Diagnosis and fault-tolerant control*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3th edition, 2016.
9. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and A. A. Michos. "Modular supervisory control for multi-floor manufacturing processes.", *Control Theory and Technology*, vol. 21, pp. 148–160, 2023.
10. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and P. Georgakopoulos, "A Distributed Supervisor Architecture for a General Wafer Production System," *Sensors*, vol. 23(9), p.4545, 2023.
11. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and K. Markou, "A Modular Supervisory Control Scheme for the Safety of an Automated Manufacturing System," *2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI)*, Singapore, Singapore, pp. 105-112, 2022.
12. L. J. van der Sanden, M. A. Reniers, M. C. W. Geilen, A. A. Basten, J. Jacobs, J. P. M. Voeten, R. R. H. and Schiffelers, "Modular model-based supervisory controller design for wafer logistics in lithography machines," *MODELS*, 416–425. IEEE, 2015.
13. R. J. M. Theunissen, M. Petreczky, R. R. H. Schiffelers. D. A. van Beek, and J. E. Rooda, "Application of supervisory control synthesis to a patient support table of a magnetic resonance imaging scanner," *IEEE Transactions on Automations Science Engineering*, vol. 11(1), pp. 20–32, 2014.
14. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, and P. G. Totomis, "Distributed Supervisor Control for a Large-Scale Waterway Lock System," *Olympiad in Engineering Science*, Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 201-212, 2023.

15. M. V. Chester and B. R. Allenby, "Perspective: The Cyber Frontier and Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 28301-28310, 2020.
16. H. Naderi, and A. Shojaei, "Digital twinning of civil infrastructures: Current state of model architectures, interoperability solutions, and future prospects," *Automation in Construction*, vol. 149, p. 104785, 2023.
17. O. E. Marai, T. Taleb and J. Song, "Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization," *IEEE Network*, vol. 35(2), pp. 136-143, 2021.
18. Z. Lv, B. Hu and H. Lv, "Infrastructure Monitoring and Operation for Smart Cities Based on IoT System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16(3), pp. 1957-1962, 2020.
19. M. Kumar, T. Singh, M. K. Maurya, A. Shivhare, A. Raut, and P. K. Singh, "Quality assessment and monitoring of river water using IoT infrastructure," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10(12), pp. 10280-10290, 2023.
20. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and A. Souliotis, "Modular Supervisory Control for the Coordination of a Manufacturing Cell with Observable Faults," *Sensors*, vol. 23(1), p. 163, 2022.
21. F. N. Koumboulis and D. G. Fragkoulis, "Input-Output Supervisor Design for Systems Analyzed in Cooperating Pairs of Subsystems," *2024 32nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Chania - Crete, Greece, pp. 43-49, 2024.
22. J. Jiang, and X. Yu, "Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches," *Annual Reviews in control*, vol. 36(1), pp. 60-72, 2012.
23. J. Zaytoon, and V. Carre-Meneatrier, "Synthesis of control implementation for discrete manufacturing systems," *International Journal of Production Research*, vol. 39(2), pp. 329-345, 2001.
24. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, and D. Papadopoulos, "Supervisory Control of Multiple Product Flow for a Flexible Manufacturing System," *In Olympiad in Engineering Science*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
25. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, G. E. Panagiotakis, E. Mavroeidis, "Safe Performance of an Industrial Autonomous Ground Vehicle in the Supervisory Control Framework," *Electronics*, vol. 12(24), p. 5035, 2023.
26. M. A. Goorden, L. Moormann, F. F. Reijnen, J. J. Verbakel, D. A. Van Beek, A. T. Hofkamp, and L. F. P. Etman, "The road ahead for supervisor synthesis," In *Dependable Software Engineering. Theories, Tools, and Applications: 6th International Symposium, SETTA 2020, Guangzhou, China, November 24-27, 2020, Proceedings 6*, Springer International Publishing, pp. 1-16, 2020.
27. A. D. Vieira, E. A. P. Santos, M. H. de Queiroz, A. B. Leal, A. D. de Paula Neto and J. E. R. Cury, "A Method for PLC Implementation of Supervisory Control of Discrete Event Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25(1), pp. 175-191, 2017.
28. N. Beatriz Portilla, M. H. de Queiroz and J. E. Cury, "Integration of supervisory control with SCADA system for a flexible manufacturing cell," *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Porto Alegre, Brazil, pp. 261-266, 2014.
29. C. Goumopoulos, "Smart City Middleware: A Survey and a Conceptual Framework," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 4015-4047, 2024
30. N. Paape, J. M. van de Mortel-Fronczak, L. Swartjes, and M. A. Reniers. "Efficient failure-recovering supervisors." *IFAC-PapersOnLine* 53, no. 2, pp. 1755-1762, 2020.

31. G. Veerasamy, R. Kannan, R. Siddharthan, G. Muralidharan, V. Sivanandam, and R. Amirtharajan, "Integration of genetic algorithm tuned adaptive fading memory Kalman filter with model predictive controller for active fault-tolerant control of cement kiln under sensor faults with inaccurate noise covariance," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 191, pp. 256-277, 2022.
32. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, G. E. Panagiotakis, and A. Markoutis, "Modeling and Supervisor Design for a Baggage Handling System," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications (FAIEMA 2023)*, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 261-272, 2023.
33. W. Fokkink, M. Goorden, J. van de Mortel-Fronczak, F. Reijnen and J. Rooda, "Supervisor Synthesis: Bridging Theory and Practice," *Computer*, vol. 55(10), pp. 48-54, Oct. 2022.
34. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, G. E. Panagiotakis, and A. Tsatsanias, "A Reconfigurable Supervisory Control Algorithm for the Parametric Model of Multi-elevator Systems in Mines," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications (FAIEMA 2023)*, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 215-227, 2023.
35. S. T. J. Forschelen, J. M. van de Mortel-Fronczak, R. Su, and J. E. Rooda, "Application of supervisory control theory to theme park vehicles," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 22(4), pp. 511–540, 2012.
36. J. Zaytoon, and S. Lafortune, "Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems," *Annual Reviews in Control*, vol. 37(2), pp. 308–320, 2013.
37. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and B. Siake, "Safe operation of a modular production system via supervisor automata," *2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Limassol, Cyprus, pp. 938-945, 2023.
38. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and K. A. Ioannou, "Control of Router Nodes in Production Manufacturing Processes," *2018 7th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Valencia, Spain, pp. 372-377, 2018.
39. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and D. Mparkas, "Modelling and Control of a Parametric Wafer Manufacturing Process," *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Bernardo do Campo, Brazil, pp. 724-730, 2023.
40. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. Ch. Kyriazis. "A two layer supervisor scheme for ring manufacturing production chains," *SouthEast European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM '16)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 48–52, 2016.
41. J. Komenda, and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 68, pp. 7286–7298, 2023.
42. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and V. C. Michalainas, "Modular supervisory control for mining process elevator systems," *2017 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, Thessaloniki, Greece, pp. 1-4, 2017.
43. R. Su, J. H. Van Schuppen and J. E. Rooda, "Maximally permissive coordinated distributed supervisory control of nondeterministic discrete-event systems," *Automatica*, vol. 48(7), pp. 1237-1247, 2012.

44. D. G. Fragkoulis, F. N. Koumboulis, N. D. Kouvakas and A. N. Menexis, "Supervisors for Gas Compressor Stations with Compression and Valve Faults," *2023 8th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, Piraeus, Greece, pp. 1-6, 2023.
45. R. Su, J. H. van Schuppen, and J. E. Rooda, "Aggregative Synthesis of Distributed Supervisors Based on Automaton Abstraction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55(7), pp. 1627-1640, 2010.
46. K. Cai, and W. M. Wonham, "New results on supervisor localization, with case studies," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 25, pp. 203–226, 2015.
47. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and L. E. Gikas, "Supervisory control for hierarchical switching of communication protocols," *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, Kastoria, Greece, pp. 1-6, 2017.
48. D. G. Fragkoulis, N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, and N. I. Georgiou, "Modelling and modular supervisory control for the AODV routing protocol," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 169, 154761, 2023.
49. J. Komenda and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68(12), pp. 7286-7298, 2023.
50. A. N. Menexis, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. D. Kouvakas, "Toward Design and Implementation of Intelligent Manufacturing in Semiconductor Production Industry with Wafer Chamber Faults," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications (FAIEMA 2023)*, Springer, Singapore, 2023.
51. W. A. F. Scotti, N. B. Portilla, M. H. de Queiroz, J. E. R. Cury, "Modular and systematic design of supervisory control system integrating PLC, SCADA and task routing for a modular production system," *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Gothenburg, Sweden, 24-28 August, 2015.
52. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and E. Zoto, "Supervisory control for surge prevention in a gas compressor station with actuator faults," *2022 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 1-6, 2022.
53. Y. Hu, Z. Ma and Z. Li, "Design of Supervisors for Active Diagnosis in Discrete Event Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65(12), pp. 5159-5172, 2020.
54. Z. Liu, X. Yin, S. Shu, F. Lin and S. Li, "Online Supervisory Control of Networked Discrete Event Systems With Control Delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67(5), pp. 2314-2329, 2022.
55. A. Kharrazi, Y. Mishra and V. Sreeram, "Discrete-Event Systems Supervisory Control for a Custom Power Park," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10(1), pp. 483-492, 2019.
56. R. Zhang and K. Cai, "On supervisor localization based distributed control of discrete-event systems under partial observation," *2016 American Control Conference (ACC)*, Boston, MA, USA, pp. 764-769, 2016.
57. H. Zhang, L. Feng and Z. Li, "A Learning-Based Synthesis Approach to the Supremal Nonblocking Supervisor of Discrete-Event Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63(10), pp. 3345-3360, 2018.