



NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

CORE DEPARTMENT

MSc THESIS

**Modular Supervisory Control of a Flexible Manufacturing Unit
using Regular Languages and Finite Deterministic Automata**

Panagiotis Kefalas

Supervisor:

Fotis N. Koumboulis, Professor

2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Προηγμένα Συστήματα Ελέγχου και Ρομποτικής»

«Advanced Control Systems and Robotics»

«Δομοστοιχειωτός Εποπτικός Έλεγχος μίας ευέλικτη
παραγωγικής μονάδας με χρήση επιδυμητών γλωσσών και
βασικών πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων»

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 τον

Παναγιώτη Κεφαλά

2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

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

«Δομοστοιχειωτός Εποπτικός Έλεγχος μίας ευέλικτη
παραγωγικής μονάδας με χρήση επιδυμητών γλωσσών και
βασικών πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

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

από τον

Παναγιώτη Κεφαλά

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».

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.»

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής το οποίο αποτελείται από τρεις ρομποτικούς βραχίονες, δύο μηχανές παραγωγής και τρεις μεταφορείς. Το σύστημα δύναται να κατεργαστεί δύο διαφορετικούς τύπους προϊόντων με διαφορετική διαδικασία παραγωγής. Θα παρουσιαστούν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων του συστήματος. Θα αναπτυχθεί το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Θα παρουσιαστούν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας του συστήματος καθώς και η προδιαγραφές συντονισμού των υποσυστημάτων. Θα παρουσιαστούν οι επιθυμητές συμπεριφορές 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, Εποπτικός έλεγχος, Ευέλικτα συστήματα παραγωγής.

Abstract

In this thesis, the mathematical model of a flexible production system consisting of three robotic arms, two production machines and three conveyors will be presented. The system can process two different types of products with a different production process. The mathematical models of the subsystems of the system will be presented. The overall system model will be calculated. All the operating and safety specifications of the system will be presented as well as the coordination specifications of the subsystems. The operating, safety and coordination specifications will be presented in the form of desired regular languages. The properties of the desired languages regarding the overall automaton of the system will be investigated. The possibility of designing a modular supervisory control architecture will be investigated.

Keywords: Deterministic Finite Automaton, Supervisory Control, Flexible Production Systems.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ. 3	
2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	3
2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΒΡΑΧΙΟΝΩΝ	5
2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΕΩΝ	8
2.4 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ	
ΓΛΩΣΣΕΣ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΟΠΤΩΝ.....	14
5.1 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,1}$	14
5.2 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΩΝ $\mathbb{K}_{D,2}$	15
5.3 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΩΝ $\mathbb{K}_{D,3}$	17
5.4 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,4}$	18
5.5 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,5}$	19
5.6 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,6}$	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	22
REFERENCES.....	23

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ευέλικτο Σύστημα Παραγωγής	3
Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής.....	4
Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής $G_{M,1}$	4
Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής $G_{M,2}$	5
Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 1.....	6
Σχήμα 6: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 2.....	7
Σχήμα 7: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 3.....	8
Σχήμα 8: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα.....	9
Σχήμα 9: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $G_{T,1}$	9
Σχήμα 10: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $G_{T,2}$	9
Σχήμα 11: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $G_{T,3}$	10
Σχήμα 12: Το αυτόματο του επόπτη S_1	15
Σχήμα 13: Το αυτόματο του επόπτη $S_{2,1}$	16
Σχήμα 14: Το αυτόματο του επόπτη $S_{2,2}$	16
Σχήμα 15: Το αυτόματο του επόπτη $S_{3,1}$	17
Σχήμα 16: Το αυτόματο του επόπτη $S_{3,2}$	18
Σχήμα 17: Το αυτόματο του επόπτη S_4	19
Σχήμα 18: Το αυτόματο του επόπτη S_5	20
Σχήμα 19: Το αυτόματο του επόπτη S_6	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, η χρήση συντονισμένων ευέλικτων υποσυστημάτων γίνεται ολοένα και πιο καθοριστική καθώς συμβάλουν στην αύξηση της απόδοσης, της αποδοτικότητας, στην εκτέλεση εργασιών επικίνδυνες για τον άνθρωπο κ.α. (βλ. εργασία [1]-[15]). Στην εργασία [1] παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και ο έλεγχος ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής με χρήση εκτεταμένων πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων ([1]-[30]). Η παρουσίαση της επιθυμητής συμπεριφοράς με κανονικές γλώσσες και η απόδειξη της ελεγκσιμότητας αυτών ως προς το συνολικό σύστημα είναι υπό διερεύνηση. Επίσης ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των επιθυμητών προδιαγραφών με χρήση εποπτών που πραγματοποιούνται με βασικά πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα που αποφεύγουν τον εγκλωβισμό είναι υπό διερεύνηση ([30]-[67]).

Θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής το οποίο αποτελείται από τρεις ρομποτικούς βραχίονες, δύο μηχανές παραγωγής και τρεις μεταφορείς [1]. Το σύστημα δύναται να κατεργαστεί δύο διαφορετικούς τύπους προϊόντων με διαφορετική διαδικασία παραγωγής. Η μοντελοποίηση των συστημάτων θα πραγματοποιηθεί με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων καθώς με χρήση των πολυμελών πράξεων μεταξύ των αυτόματων ([1]-[30]). Η επιθυμητές συμπεριφορές θα προσδιοριστούν σε μορφή επιθυμητών γλωσσών ([20]-[35]). Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών που βασίζονται στις επιμέρους αναλυτικές επιθυμητές γλώσσες. Θα μελετηθούν οι ιδιότητες των γλωσσών ώστε να ικανοποιούνται ικανές συνθήκες για την επίλυση του προβλήματος του δομοστοιχειωτού ελέγχου ([20]-[66]). Ο σχεδιασμός της δομοστοιχειωτής αρχιτεκτονικής εποπτικού ελέγχου θα γίνει με χρήση δυναμικών εποπτών που πραγματοποιούνται με βασικά πεπερασμένα ντετερμινιστικά αυτόματα.

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

Στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστεί το μοντέλο των υποσυστημάτων της μονάδας, δηλαδή τα μοντέλα των μηχανών παραγωγής, των ρομποτικών βραχιόνων και των μεταφορέων.

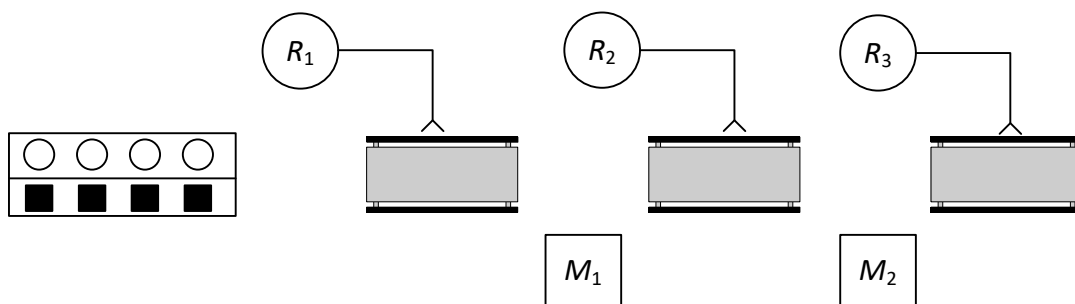
Στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιαστούν οι προδιαγραφές ασφαλείας της μονάδας παραγωγής και οι αντίστοιχες κανονικές γλώσσες..

Στο Κεφάλαιο 4 θα παρουσιαστεί οι προδιαγραφές συντονισμού της μονάδας παραγωγής και οι αντίστοιχες κανονικές γλώσσες.

Στο Κεφάλαιο 6 θα σχεδιαστούν οι επόπτες του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το ευέλικτο σύστημα παραγωγής αποτελείται από τρεις ρομποτικούς βραχίονες, δύο μηχανές παραγωγής και τρεις μεταφορείς. Το σύστημα δύναται να κατεργαστεί δύο διαφορετικούς τύπους προϊόντων με διαφορετική διαδικασία παραγωγής. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το ευέλικτο σύστημα παραγωγής.



Σχήμα 1: Ευέλικτο Σύστημα Παραγωγής

2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει τη συμπεριφορά των μηχανών παραγωγής είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_M = (\mathbb{Q}_M, \mathbf{E}_M, f_M, \mathbb{H}_M, x_{M,0}, \mathbb{Q}_{M,m}).$$

Η περιγραφή του αυτόματου είναι η ακόλουθη

$$\mathbb{Q}_M = \{q_{M,1}, q_{M,2}\}, \mathbf{E}_M = \{e_{M,1}, e_{M,2}\},$$

$$f_M(q_{M,1}, e_{M,1}) = q_{M,2}, f_M(q_{M,2}, e_{M,2}) = q_{M,1},$$

$$\mathbb{H}_M(q_{M,1}) = \{e_{M,1}\}, \mathbb{H}_M(q_{M,2}) = \{e_{M,2}\},$$

$$x_{M,0} = q_{M,1}, \mathbb{Q}_{M,m} = \{q_{M,1}\}.$$

Στην κατάσταση $q_{M,1}$ η μηχανή παραγωγής δεν επεξεργάζεται κάποιο προϊόν. Στην κατάσταση $q_{M,2}$ η μηχανή παραγωγής επεξεργάζεται κάποιο προϊόν. Το συμβάν $e_{M,1}$ είναι η εντολή ενεργοποίησης της μηχανής παραγωγής. Το συμβάν $e_{M,2}$ είναι η εντολή απενεργοποίησης της μηχανής παραγωγής. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{M,c} = \{e_{M,1}, e_{M,2}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{M,uc} = \emptyset$. Η συμπεριφορά του αυτόματου της μηχανής παραγωγής είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_M) = \overline{(e_{M,1}e_{M,2})^*}.$$

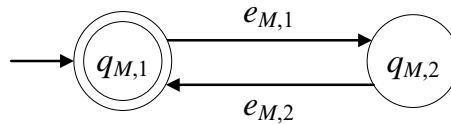
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου της μηχανής παραγωγής είναι

$$\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_M) = (e_{M,1}e_{M,2})^*.$$

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

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

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου της μηχανής παραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



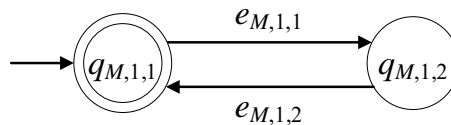
Σχήμα 2: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής

Σύμφωνα με το Σχήμα 1 η μονάδα παραγωγής αποτελείται από δυο μηχανές παραγωγής. Στην [1] οι μηχανές παραγωγής ορίζονται ως μία μηχανή κατεργασίας και μία μηχανή ελέγχου του προϊόντος. Έτσι στην περίπτωση των δύο μηχανών της παρούσα μονάδας, τα μοντέλα γίνονται

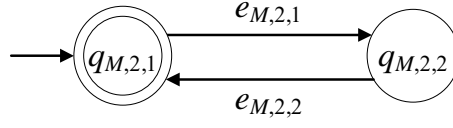
$$\mathbf{G}_{M,1} = (\mathbb{Q}_{M,1}, \mathbb{E}_{M,1}, f_{M,1}, \mathbb{H}_{M,1}, x_{M,1,0}, \mathbb{Q}_{M,1,m})$$

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

Τα αντίστοιχα διαγράμματα κατάστασης παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 και 4.



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής $\mathbf{G}_{M,1}$



Σχήμα 4: Διάγραμμα κατάστασης της μηχανής παραγωγής $\mathbf{G}_{M,2}$

2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΒΡΑΧΙΟΝΩΝ

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει τη συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα 1 είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{R,1} = (\mathbb{Q}_{R,1}, \mathbb{E}_{R,1}, f_{R,1}, \mathbb{H}_{R,1}, x_{R,1,0}, \mathbb{Q}_{R,1,m}).$$

Η περιγραφή του αυτόματου είναι η ακόλουθη

$$\mathbb{Q}_{R,1} = \{q_{R,1,1}, q_{R,1,2}\}, \mathbb{E}_{R,1} = \{e_{R,1,1}, e_{R,1,2}, e_{R,1,3}\},$$

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

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

$$x_{R,1,0} = q_{R,1,1}, \mathbb{Q}_{R,1,m} = \{q_{R,1,1}\}.$$

Στην κατάσταση $q_{R,1,1}$ ο ρομποτικός βραχίονας είναι άδειος. Στην κατάσταση $q_{R,1,2}$ ο ρομποτικός βραχίονας έχει ένα προϊόν. Το συμβάν $e_{R,1,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να πάρει ένα προϊόν. Το συμβάν $e_{R,1,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν κατηγορίας 1 στον μεταφορέα 1. Το συμβάν $e_{R,1,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν κατηγορίας 2 στον μεταφορέα 1. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,1,c} = \{e_{R,1,1}, e_{R,1,2}, e_{R,1,3}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,1,uc} = \emptyset$. Η συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1 είναι

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

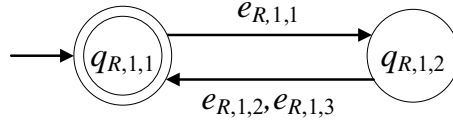
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1 είναι

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

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,1})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,1}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 1

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει τη συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα 2 είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{R,2} = (\mathbb{Q}_{R,2}, \mathbb{E}_{R,2}, f_{R,2}, \mathbb{H}_{R,2}, x_{R,2,0}, \mathbb{Q}_{R,2,m}).$$

Η περιγραφή του αυτόματου είναι η ακόλουθη

$$\mathbb{Q}_{R,2} = \{q_{R,2,1}, q_{R,2,2}, q_{R,2,3}\}, \mathbb{E}_{R,2} = \{e_{R,2,1}, e_{R,2,2}, e_{R,2,3}, e_{R,2,4}\},$$

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

$$f_{R,2}(q_{R,2,2}, e_{R,2,3}) = q_{R,2,1}, f_{R,2}(q_{R,2,2}, e_{R,2,4}) = q_{R,2,1}, f_{R,2}(q_{R,2,3}, e_{R,2,4}) = q_{R,2,1}$$

$$\mathbb{H}_{R,2}(q_{R,2,1}) = \{e_{R,2,1}, e_{R,2,2}\}, \mathbb{H}_{R,2}(q_{R,2,2}) = \{e_{R,2,3}, e_{R,2,4}\}, \mathbb{H}_{R,2}(q_{R,2,3}) = \{e_{R,2,4}\}$$

$$x_{R,2,0} = q_{R,2,1}, \mathbb{Q}_{R,2,m} = \{q_{R,2,1}\}.$$

Στην κατάσταση $q_{R,2,1}$ ο ρομποτικός βραχίονας είναι άδειος. Στην κατάσταση $q_{R,2,2}$ ο ρομποτικός βραχίονας έχει ένα προϊόν από τον μεταφορέα 1. Στην κατάσταση $q_{R,2,3}$ ο ρομποτικός βραχίονας έχει ένα προϊόν από τη μηχανή παραγωγής 1. Το συμβάν $e_{R,2,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να πάρει ένα προϊόν από τον μεταφορέα 1. Το συμβάν $e_{R,2,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να πάρει ένα προϊόν από τη μηχανή παραγωγής 1. Το συμβάν $e_{R,2,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν στη μηχανή παραγωγής 1. Το συμβάν $e_{R,2,4}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν στον μεταφορέα 2. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,2,c} = \{e_{R,2,1}, e_{R,2,2}, e_{R,2,3}, e_{R,2,4}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,2,uc} = \emptyset$. Η συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2 είναι

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

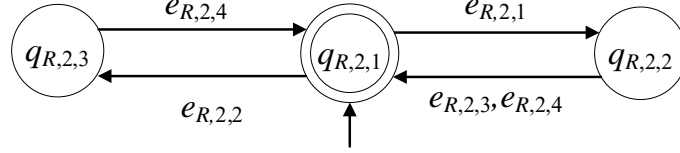
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2 είναι

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

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,2})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,2}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 2

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει τη συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα 3 είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_{R,3} = (\mathbb{Q}_{R,3}, \mathbb{E}_{R,3}, f_{R,3}, \mathbb{H}_{R,3}, x_{R,3,0}, \mathbb{Q}_{R,3,m}).$$

Η περιγραφή του αυτόματου είναι η ακόλουθη

$$\mathbb{Q}_{R,3} = \{q_{R,3,1}, q_{R,3,2}, q_{R,3,3}\}, \mathbb{E}_{R,3} = \{e_{R,3,1}, e_{R,3,2}, e_{R,3,3}, e_{R,3,4}\},$$

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

$$f_{R,3}(q_{R,3,2}, e_{R,3,3}) = q_{R,3,1}, f_{R,3}(q_{R,3,3}, e_{R,3,4}) = q_{R,3,1}$$

$$\mathbb{H}_{R,3}(q_{R,3,1}) = \{e_{R,3,1}, e_{R,3,2}\}, \mathbb{H}_{R,3}(q_{R,3,2}) = \{e_{R,3,3}\}, \mathbb{H}_{R,3}(q_{R,3,3}) = \{e_{R,3,4}\}$$

$$x_{R,3,0} = q_{R,3,1}, \mathbb{Q}_{R,3,m} = \{q_{R,3,1}\}.$$

Στην κατάσταση $q_{R,3,1}$ ο ρομποτικός βραχίονας είναι άδειος. Στην κατάσταση $q_{R,3,2}$ ο ρομποτικός βραχίονας έχει ένα προϊόν από τον μεταφορέα 2. Στην κατάσταση $q_{R,3,3}$ ο ρομποτικός βραχίονας έχει ένα προϊόν από τη μηχανή παραγωγής 2. Το συμβάν $e_{R,3,1}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να πάρει ένα προϊόν από τον μεταφορέα 2. Το συμβάν $e_{R,3,2}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να πάρει ένα προϊόν από τη μηχανή παραγωγής 2. Το συμβάν $e_{R,3,3}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν στη μηχανή παραγωγής 2. Το συμβάν $e_{R,3,4}$ είναι η εντολή στον ρομποτικό βραχίονα να αφήσει ένα προϊόν στον μεταφορέα 3. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,3,c} = \{e_{R,3,1}, e_{R,3,2}, e_{R,3,3}, e_{R,3,4}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{R,3,nc} = \emptyset$. Η συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3 είναι

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

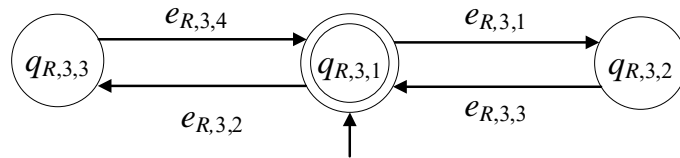
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3 είναι

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

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

$$\overline{\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,3})} = \mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,3}).$$

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του ρομποτικού βραχίονα 3 παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Διάγραμμα κατάστασης του ρομποτικού βραχίονα 3

2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΕΩΝ

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει τη συμπεριφορά των μεταφορέων είναι της μορφής

$$\mathbf{G}_T = (\mathbb{Q}_T, \mathbb{E}_T, f_T, \mathbb{H}_T, x_{T,0}, \mathbb{Q}_{T,m}).$$

Η περιγραφή του αυτόματου είναι η ακόλουθη

$$\mathbb{Q}_T = \{q_{T,1}, q_{T,2}\}, \mathbb{E}_T = \{e_{T,1}, e_{T,2}\},$$

$$f_T(q_{T,1}, e_{T,1}) = q_{T,2}, f_T(q_{T,2}, e_{T,2}) = q_{T,1},$$

$$\mathbb{H}_T(q_{T,1}) = \{e_{T,1}\}, \mathbb{H}_T(q_{T,2}) = \{e_{T,2}\},$$

$$x_{T,0} = q_{T,1}, \mathbb{Q}_{T,m} = \{q_{T,1}\}.$$

Στην κατάσταση $q_{T,1}$ ο μεταφορέας είναι ακίνητος. Στην κατάσταση $q_{T,2}$ ο μεταφορέας κινείται. Το συμβάν $e_{T,1}$ είναι η εντολή εκκίνησης του μεταφορέα. Το συμβάν $e_{T,2}$ είναι η εντολή απενεργοποίησης του μεταφορέα. Το σύνολο των ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{T,c} = \{e_{T,1}, e_{T,2}\}$ και το σύνολο των μη ελέγξιμων συμβάντων είναι $\mathbb{E}_{T,uc} = \emptyset$. Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου του μεταφορέα είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{G}_T) = \overline{(e_{T,1}e_{T,2})^*}.$$

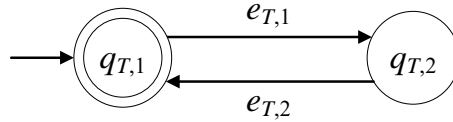
Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου του μεταφορέα είναι

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

Το σύστημα αποφεύγει τον εγκλωβισμό καθώς

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

Το διάγραμμα κατάστασης του αυτόματου του μεταφορέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα

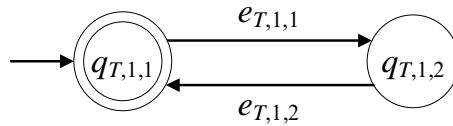
Σύμφωνα με το Σχήμα 1 η μονάδα παραγωγής αποτελείται από τρεις μεταφορείς. Έτσι στην περίπτωση των τριών μεταφορέων της παρούσα μονάδας, τα μοντέλα γίνονται

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

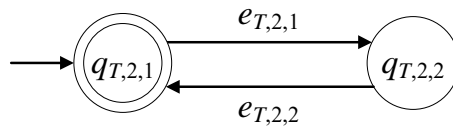
$$\mathbf{G}_{T,2} = (\mathbb{Q}_{T,2}, \mathbb{E}_{T,2}, f_{T,2}, \mathbb{H}_{T,2}, x_{T,2,0}, \mathbb{Q}_{T,2,m})$$

$$\mathbf{G}_{T,3} = (\mathbb{Q}_{T,3}, \mathbb{E}_{T,3}, f_{T,3}, \mathbb{H}_{T,3}, x_{T,3,0}, \mathbb{Q}_{T,3,m})$$

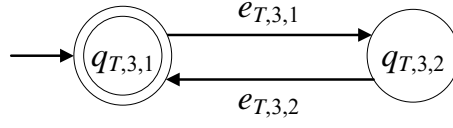
Τα αντίστοιχα διαγράμματα κατάστασης παρουσιάζονται στα Σχήματα 9, 10 και 11.



Σχήμα 9: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $\mathbf{G}_{T,1}$



Σχήμα 10: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $\mathbf{G}_{T,2}$



Σχήμα 11: Διάγραμμα κατάστασης του μεταφορέα $\mathbf{G}_{T,3}$

2.4 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το πεπερασμένο ντετερμινιστικό αυτόματο που περιγράφει το συνολικό μοντέλο της μονάδας παραγωγής προκύπτει από το σύγχρονο γινόμενο όλων των υποσυστημάτων των μηχανών παραγωγής, των ρομποτικών βραχιόνων και των μεταφορέων. Έτσι, το μοντέλο της μονάδας παραγωγής είναι της μορφής

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{M,1} \parallel \mathbf{G}_{M,2} \parallel \mathbf{G}_{R,1} \parallel \mathbf{G}_{R,2} \parallel \mathbf{G}_{R,3} \parallel \mathbf{G}_{T,1} \parallel \mathbf{G}_{T,2} \parallel \mathbf{G}_{T,3}$$

Οι καταστάσεις είναι της μορφής

$$q = \{q_{M,1}, q_{M,2}, q_{R,1}, q_{R,2}, q_{R,3}, q_{T,1}, q_{T,2}, q_{T,3}\}$$

όπου προκύπτουν από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των οκτώ αυτόματων. Έτσι οι συνολικές καταστάσεις είναι $2^5 \times 3^3 = 288$. Το αλφάβητο του \mathbf{G} είναι

$$\mathbb{E} = \mathbb{E}_{M,1} \cup \mathbb{E}_{M,2} \cup \mathbb{E}_{R,1} \cup \mathbb{E}_{R,2} \cup \mathbb{E}_{R,3} \cup \mathbb{E}_{T,1} \cup \mathbb{E}_{T,2} \cup \mathbb{E}_{T,3}.$$

Ο αριθμός των συμβάντων του αλφάβητου του \mathbf{G} είναι 20.

Η κλειστή συμπεριφορά του αυτόματου \mathbf{G} είναι

$$\begin{aligned} \mathbb{L}(\mathbf{G}) = & P_{M,1}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{M,1})) \cap P_{M,2}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{M,2})) \cap P_{R,1}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,1})) \cap P_{R,2}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,2})) \\ & \cap P_{R,3}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{R,3})) \cap P_{T,1}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{T,1})) \cap P_{T,2}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{T,2})) \cap P_{T,3}^{-1}(\mathbb{L}(\mathbf{G}_{T,3})). \end{aligned}$$

Η σημαδεμένη συμπεριφορά του αυτόματου \mathbf{G} είναι

$$\begin{aligned} \mathbb{L}_m(\mathbf{G}) = & P_{M,1}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{M,1})) \cap P_{M,2}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{M,2})) \cap P_{R,1}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,1})) \cap P_{R,2}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,2})) \\ & \cap P_{R,3}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{R,3})) \cap P_{T,1}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{T,1})) \cap P_{T,2}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{T,2})) \cap P_{T,3}^{-1}(\mathbb{L}_m(\mathbf{G}_{T,3})). \end{aligned}$$

Τα $P_{M,1}$, $P_{M,2}$, $P_{R,1}$, $P_{R,2}$, $P_{R,3}$, $P_{T,1}$, $P_{T,2}$, και $P_{T,3}$ είναι προβολές των αλφαβητών $\mathbb{E}_{M,1}^*$, $\mathbb{E}_{M,2}^*$, $\mathbb{E}_{R,1}^*$, $\mathbb{E}_{R,2}^*$, $\mathbb{E}_{R,3}^*$, $\mathbb{E}_{T,1}^*$, $\mathbb{E}_{T,2}^*$ και $\mathbb{E}_{T,3}^*$ στο αλφάβητο \mathbb{E}^* .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Για την σωστή και ασφαλή λειτουργία της μονάδας παραγωγής θα πρέπει να οριστούν συγκεκριμένοι κανόνες τις οποίες θα πρέπει να ακολουθεί το σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Στη συνέχεια οι κανόνες θα εκφραστούν οι κανόνες περιγράφοντας την επιθυμητή συμπεριφορά και στη συνέχεια θα μεταφραστούν στις αντίστοιχες επιθυμητές κανονικές γλώσσες. Οι κανόνες για την ασφαλή λειτουργία είναι οι ακόλουθοι:

- E1. Ο ρομποτικός βραχίονας 1 δεν επιτρέπεται να αφήσει προϊόν εάν ο μεταφορέας 1 δεν έχει προωθήσει το προϊόν.
- E2. Ο ρομποτικός βραχίονας 2 δεν μπορεί να πάρει προϊόν από τον μεταφορέα 1 ή από τη μηχανή παραγωγής 1 εάν αυτές δεν έχουν προϊόν.
- E3. Ο ρομποτικός βραχίονας 3 δεν μπορεί να πάρει προϊόν από τον μεταφορέα 2 ή από τη μηχανή παραγωγής 2 εάν αυτές δεν έχουν προϊόν.
- E4. Η μηχανή παραγωγής 1 μπορεί να εκκινήσει μόνο έχει αφήσει προϊόν ο ρομποτικός βραχίονας 2.
- E5. Η μηχανή παραγωγής 2 μπορεί να εκκινήσει μόνο έχει αφήσει προϊόν ο ρομποτικός βραχίονας 3.

Οι παραπάνω κανόνες ασφαλούς λειτουργίας θα μεταφραστούν σε κανονικές γλώσσες.

Για τον κανόνα E1 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

$$\mathbb{K}_{D,1} = \overline{((e_{R,1,2} + e_{R,1,3})e_{T,1,1})^*}.$$

Για τον κανόνα E2 οι αντίστοιχες γλώσσες είναι

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

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

Για τον κανόνα E3 οι αντίστοιχες γλώσσες είναι

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

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

Για τον κανόνα E4 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

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

Για τον κανόνα E5 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

$$\mathbb{K}_{D,5} = \overline{(e_{R,3,3}e_{M,2,1})}^*$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Για τον συντονισμό των υποσυστημάτων της μονάδας παραγωγής θα πρέπει να οριστούν συγκεκριμένοι κανόνες τις οποίες θα πρέπει να ακολουθεί το σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Οι κανόνες για τον συντονισμό των υποσυστημάτων είναι οι ακόλουθοι:

Σ1. Η μηχανή παραγωγής 1 πρέπει να δέχεται μόνο προϊόντα κατηγορίας 1.

Σ2. Όταν η μηχανή παραγωγής 1 βγάλει προϊόν τότε ο ρομποτικός βραχίονας 2 μπορεί να πάρει το προϊόν.

Σ3. Όταν η μηχανή παραγωγής 2 βγάλει προϊόν τότε ο ρομποτικός βραχίονας 3 μπορεί να πάρει το προϊόν.

Οι παραπάνω κανόνες συντονισμού θα μεταφραστούν σε κανονικές γλώσσες.

Για τον κανόνα Σ1 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

$$\mathbb{K}_{D,6} = \overline{(e_{R,1,2}e_{M,1,1})^*}.$$

Για τον κανόνα Σ2 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

$$\mathbb{K}_{D,7} = \overline{(e_{M,1,2}e_{R,2,1})^*}.$$

Για τον κανόνα Σ2 η αντίστοιχη γλώσσα είναι

$$\mathbb{K}_{D,8} = \overline{(e_{M,2,2}e_{R,3,1})^*}.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΟΠΤΩΝ

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

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,1}$ ο επόπτης είναι

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

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

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

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

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

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

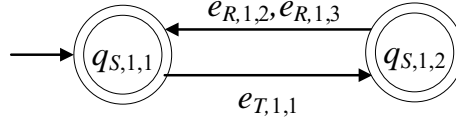
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,1}) = \{e_{R,1,2}, e_{R,1,3}\} \quad \text{και} \quad \mathbb{H}_{S,1}(q_{S,1,2}) = \{e_{T,1,1}\}$$

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_1) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_1) = \overline{((e_{R,1,2} + e_{R,1,3})e_{T,1,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Το αυτόματο του επόπτη S_1

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

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,2,1}$ ο επόπτης είναι

$$\mathbf{S}_{2,1} = (\mathbb{Q}_{S,2,1}, \mathbb{E}_{S,2,1}, f_{S,2,1}, \mathbb{H}_{S,2,1}, x_{S,2,1,0}, \mathbb{Q}_{S,2,1,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,2,1} = \{e_{T,1,2}, e_{R,2,1}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,2,1,0} = q_{S,2,1,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,2,1,m} = \mathbb{Q}_{S,2,1}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

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

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

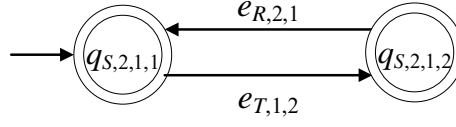
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

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

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_{2,1}) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_{2,1}) = \overline{(e_{T,1,2}e_{R,2,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Το αυτόματο του επόπτη $\mathbf{S}_{2,1}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,2,2}$ ο επόπτης είναι

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

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,2,2} = \{e_{M,1,2}, e_{R,2,1}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,2,2,0} = q_{S,2,2,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,2,2,m} = \mathbb{Q}_{S,2,2}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

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

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

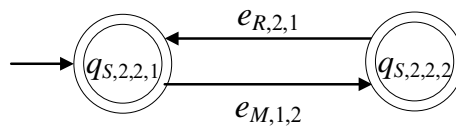
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

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

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_{2,2}) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_{2,2}) = \overline{(e_{M,1,2}e_{R,2,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Το αυτόματο του επόπτη $\mathbf{S}_{2,2}$

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

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,3,1}$ ο επόπτης είναι

$$\mathbf{S}_{3,1} = (\mathbb{Q}_{S,3,1}, \mathbb{E}_{S,3,1}, f_{S,3,1}, \mathbb{H}_{S,3,1}, x_{S,3,1,0}, \mathbb{Q}_{S,3,1,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

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

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,3,1,0} = q_{S,3,1,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,3,1,m} = \mathbb{Q}_{S,3,1}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

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

$$\text{και } f_{S,3,1}(q_{S,3,1,2}, e_{R,3,1}) = q_{S,3,1,1}$$

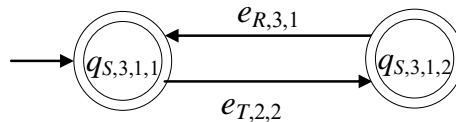
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

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

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_{3,1}) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_{3,1}) = \overline{(e_{T,2,2}e_{R,3,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Το αυτόματο του επόπτη $\mathbf{S}_{3,1}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,3,2}$ ο επόπτης είναι

$$\mathbf{S}_{3,2} = (\mathbb{Q}_{S,3,2}, \mathbb{E}_{S,3,2}, f_{S,3,2}, \mathbb{H}_{S,3,2}, x_{S,3,2,0}, \mathbb{Q}_{S,3,2,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

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

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,3,2,0} = q_{S,3,2,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,3,2,m} = \mathbb{Q}_{S,3,2}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

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

$$\text{και } f_{S,3,2}(q_{S,3,2,2}, e_{R,3,1}) = q_{S,3,2,1}$$

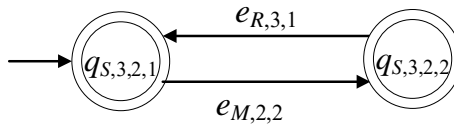
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

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

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_{3,2}) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_{3,2}) = \overline{(e_{M,2,2}e_{R,3,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16: Το αυτόματο του επόπτη $\mathbf{S}_{3,2}$

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

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,4}$ ο επόπτης είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_4 = (\mathbb{Q}_{S,4}, \mathbb{E}_{S,4}, f_{S,4}, \mathbb{H}_{S,4}, x_{S,4,0}, \mathbb{Q}_{S,4,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

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

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,4} = \{e_{M,1,1}, e_{R,2,3}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,4,0} = q_{S,4,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,4,m} = \mathbb{Q}_{S,4}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,4}(q_{S,4,1}, e_{R,2,3}) = q_{S,4,2},$$

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

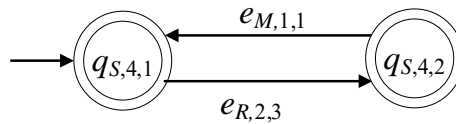
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,4}(q_{S,4,1}) = \{e_{R,2,3}\}, \mathbb{H}_{S,4}(q_{S,4,2}) = \{e_{M,1,1}\},$$

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_4) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_4) = \overline{(e_{R,2,3}e_{M,1,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17: Το αυτόματο του επόπτη \mathbf{S}_4

5.5 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,5}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,5}$ ο επόπτης είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_5 = (\mathbb{Q}_{S,5}, \mathbb{E}_{S,5}, f_{S,5}, \mathbb{H}_{S,5}, x_{S,5,0}, \mathbb{Q}_{S,5,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,5} = \{q_{S,5,1}, q_{S,5,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,5} = \{e_{R,3,3}, e_{M,2,1}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,5,0} = q_{S,5,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,5,m} = \mathbb{Q}_{S,5}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,5}(q_{S,5,1}, e_{R,3,3}) = q_{S,5,2},$$

$$\text{και } f_{S,5}(q_{S,5,2}, e_{M,2,1}) = q_{S,5,1}$$

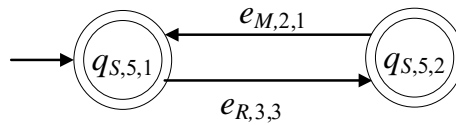
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,5}(q_{S,5,1}) = \{e_{R,3,3}\}, \mathbb{H}_{S,5}(q_{S,5,2}) = \{e_{M,2,1}\}$$

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_5) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_5) = \overline{(e_{R,3,3}e_{M,2,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18: Το αυτόματο του επόπτη \mathbf{S}_5

5.6 ΕΠΟΠΤΗΣ ΓΛΩΣΣΑΣ $\mathbb{K}_{D,6}$

Για την επιθυμητή γλώσσα $\mathbb{K}_{D,5}$ ο επόπτης είναι της μορφής

$$\mathbf{S}_6 = (\mathbb{Q}_{S,6}, \mathbb{E}_{S,6}, f_{S,6}, \mathbb{H}_{S,6}, x_{S,6,0}, \mathbb{Q}_{S,6,m})$$

Το σύνολο των καταστάσεων του επόπτη είναι

$$\mathbb{Q}_{S,6} = \{q_{S,6,1}, q_{S,6,2}\}$$

Το αλφάβητο του επόπτη είναι

$$\mathbb{E}_{S,6} = \{e_{R,1,2}, e_{M,1,1}\}$$

Η αρχική κατάσταση είναι $x_{S,6,0} = q_{S,6,1}$.

Το σύνολο το σημαδεμένων καταστάσεων είναι $\mathbb{Q}_{S,6,m} = \mathbb{Q}_{S,6}$.

Οι συναρτήσεις μετάβασης είναι

$$f_{S,6}(q_{S,6,1}, e_{R,1,2}) = q_{S,6,2},$$
$$\text{και } f_{S,6}(q_{S,6,2}, e_{M,1,1}) = q_{S,6,1}$$

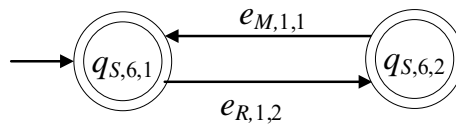
Τα σύνολο των ενεργών συμβάντων ανά κατάσταση είναι

$$\mathbb{H}_{S,6}(q_{S,6,1}) = \{e_{R,1,2}\}, \mathbb{H}_{S,6}(q_{S,6,2}) = \{e_{M,1,1}\}$$

Η γλώσσα που παράγει και σημαδεύει το αυτόματο είναι

$$\mathbb{L}(\mathbf{S}_6) = \mathbb{L}_m(\mathbf{S}_6) = \overline{(e_{R,1,2}e_{M,1,1})^*}$$

Το αυτόματο του επόπτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Το αυτόματο του επόπτη \mathbf{S}_6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο ενός ευέλικτου συστήματος παραγωγής το οποίο αποτελείται από τρεις ρομποτικούς βραχίονες, δύο μηχανές παραγωγής και τρεις μεταφορείς. Το σύστημα δύναται να κατεργαστεί δύο διαφορετικούς τύπους προϊόντων με διαφορετική διαδικασία παραγωγής. Παρουσιάστηκαν τα μαθηματικά μοντέλα των υποσυστημάτων του συστήματος. Αναπτύχθηκε το συνολικό μοντέλο του συστήματος. Παρουσιάστηκαν όλες οι προδιαγραφές λειτουργίας και ασφαλείας του συστήματος καθώς και η προδιαγραφές συντονισμού των υποσυστημάτων. Παρουσιάστηκαν οι επιθυμητές συμπεριφορές σε μορφή επιθυμητών κανονικών γλωσσών. Διερευνήθηκαν οι ιδιότητες των επιθυμητών γλωσσών ως προς το συνολικό αυτόματο του συστήματος. Σχεδιάστηκε μία δομοστοιχειωτή αρχιτεκτονική εποπτικού ελέγχου. Ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος ελέγχου με χρήση πεπερασμένων ντετερμινιστικών αυτόματων και ελέγχου ρομποτικών συστημάτων στο συνεχή χρόνο ([68]-[72]) είναι υπό διερεύνηση.

REFERENCES

1. A. L. Silva, R. Ribeiro and M. Teixeira, "Modeling and control of flexible context-dependent manufacturing systems," *Information Sciences*, vol. 421, pp. 1–14, 2017.
2. 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.
3. 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.
4. B. Alkan, D. Vera, B. Ahmad, and R. Harrison, "A Method to Assess Assembly Complexity of Industrial Products in Early Design Phase," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 989-999, 2018.
5. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, M. P. Tzamtzi, and D. Papadopoulos, "Supervisory Control of Multiple Product Flow for a Flexible Manufacturing System," *Advances in Computational Mechanics and Applications, OES 2023*, vol 29. Springer, Cham, 2023.
6. 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.
7. C. G. Casandras and S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
8. W. M. Wonham and C. Kai, *Supervisory control of discrete-event systems*, Springer International Publishing, 2019.
9. 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.
10. 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.
11. N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, A. Souliotis, "Modular Supervisory Control for the Coordination of a Manufacturing Cell with Observable Faults," *Sensors*, vol. 23(1), p. 163, 2023.
12. R. Meira-Góes, S. Lafortune and H. Marchand, "Synthesis of Supervisors Robust Against Sensor Deception Attacks," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66, no. 10, pp. 4990-4997, 2021.
13. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and A. A. Michos, "Modular supervisory control for multi-floor manufacturing processes," *Control Theory Technol*, vol. 21, pp. 148–160, 2023.
14. R. Szpak, M. H. de Queiroz, and J. E. R. Cury, "Synthesis and implementation of supervisory control for manufacturing systems under processing uncertainties and time constraints," *IFAC PaperOnLine*, vol. 53, pp. 229–234, 2020.

15. H. Tang, D. Li, S. Wang, and Z. Dong, "CASOA: An Architecture for Agent-Based Manufacturing System in the Context of Industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12746-12754, 2018.
16. 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.
17. T. Ohtsuka, C. Kai, and K. Kenji, "Data-Informativity for Data-Driven Supervisory Control of Discrete-Event Systems," *2023 62nd IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 6923-6928, 2023.
18. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and P. Georgakopoulos, "A Distributed Supervisor Architecture for a General Wafer Production System," *Sensors*, vol. 23, p. 4545, 2023.
19. J. Sigalas, F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis, and N. D. Kouvakas, "Fault Tolerance of a Circular Manufacturing System in the Framework of Supervisory Control Theory," *Frontiers of Artificial Intelligence, Ethics, and Multidisciplinary Applications (FAIEMA 2023)*, Springer, Singapore, 2023.
20. 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.
21. 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, 48–52, 2016.
22. 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.
23. R. Su, J. H. van Schuppen, and J. E. Rooda, "The Synthesis of Time Optimal Supervisors by Using Heaps-of-Pieces," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 57(1), pp. 105-118, 2012.
24. R. Su, "Coordinated distributed time optimal supervisory control," *Proc. of the American Control Conference (ACC)*, pp. 905-910, 2013.
25. K. Cai, and W. M. Wonham, "New results on supervisor localization, with case studies," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 25, pp. 203–226, 2015.
26. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and S. Arapakis, "Supervisor design for an assembly line in the presence of faults," *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany, pp. 1-8, 2022.
27. B. Huang, M. Zhou, C. Wang, A. Abusorrah and Y. Al-Turki, "Deadlock-free Supervisor Design for Robotic Manufacturing Cells With Uncontrollable and Unobservable Events," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, no. 3, pp. 597-605, 2021.
28. 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.

29. 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.
30. 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.
31. J. Komenda, T. Masopust, and J. H. van Schuppen, "Synthesis of controllable and normal sublanguages for discrete-even systems using a coordinator," *Syst. Control Lett.*, vol. 60, pp. 492–502, 2011.
32. 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.
33. 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.
34. J. Komenda and T. Masopust, "Hierarchical Supervisory Control Under Partial Observation: Normality," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68(12), pp. 7286-7298, 2023.
35. F. Göbe, O. Ney, and S. Kowalewski, "Reusability and modularity of safety specifications for supervisory control," *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1-8, 2016.
36. 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)*, Springer, Singapore, 2023.
37. 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.
38. A. Nejati, A. Lavaei, P. Jagtap, S. Soudjani and M. Zamani, "Formal Verification of Unknown Discrete- and Continuous-Time Systems: A Data-Driven Approach," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68(5), pp. 3011-3024, 2023.
39. M. Konishi, T. Sasaki, and K. Cai, "Efficient safe control via deep reinforcement learning and supervisory control – case study on multirobot warehouse automation," *Proc. IFAC WODES*, 2022.
40. 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)*, Springer, Singapore, 2023.
41. M. D. Prieto, Á. F. Sobrino, L. R. Soto, D. Romero, P. F. Biosca and L. R. Martínez, "Active Learning based Laboratory towards Engineering Education 4.0," *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, pp. 776-783, 2019.

42. R. Oueslati, O. Mosbahi, M. Khalgui, Z. Li and T. Qu, "Combining Semi-Formal and Formal Methods for the Development of Distributed Reconfigurable Control Systems," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70426-70443, 2018.
43. C. Economakos and F. N. Koumboulis, "Modular Implementation of Robust Supervisory Controllers for Discrete Event Systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 6, pp. 1559-1563, 2008.
44. J. Zhang and W. M. Wonham, "Bidirectional Dynamic Reconfiguration of Discrete-Event Systems," *2020 American Control Conference (ACC)*, pp. 3659-3664, 2020.
45. M. Khalgui and K. Thramboulidis, "An IEC61499-based development approach for distributed industrial control applications," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Vol.4 No.2, 2008.
46. V. Vyatkin, H. Hanisch, C. Pang and C. Yang, "Closed-Loop Modeling in Future Automation System Engineering and Validation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 39, no. 1, pp. 17-28, 2009.
47. K. Thramboulidis and A. Buda, "3+1 SysML view model for IEC61499 Function Block control systems," *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 175-180, 2010.
48. T. Hussain and G. Frey, "Migration of a PLC Controller to an IEC 61499 Compliant Distributed Control System: Hands-on Experiences," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3984-3989, 2005.
49. A. Rashidinejad, M. Reniers and M. Fabian, "Supervisory Control of Discrete-Event Systems in an Asynchronous Setting," *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 494-501, 2019.
50. N. L. Iacobici, F. Demeter, F. M. Frigura-Iliasa, L. Dolga, H. Filipescu and M. Iorga, "Supervisory Control of Discrete Event Systems in Manufacturing Industry," *2019 2nd International Conference of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE)*, Singapore, pp. 42-45, 2019.
51. E. Dogaru, F. M. Frigura-Iliasa, M. Iorga, L. Dolga, H. Filipescu and M. Frigura-Iliasa, "PLC Commanded Intelligent Logistics Model Based on Discrete Event Systems," *2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Singapore, pp. 159-163, 2019.
52. F. Göbe, S. Aydin and S. Kowalewski, "Applicability of supervisory control theory for the supervision of PLC programs," *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Limassol, Cyprus, p. 1-8, 2017.
53. A. N. Menexis, D. G. Fragkoulis, F. N. Koumboulis and M. G. Skarpetis, "A FIWARE based Input-Output Supervisor Control Implementation," *2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Padova, Italy, 2024.
54. D. Bhamare, M. Zolanvari, A. Erbad, R. Jain, K. Khan, and N. Meskin, "Cybersecurity for industrial control systems: A survey," *computers & security*, vol. 89, p. 101677, 2020.
55. D. G. Fragkoulis, F. N. Koumboulis, M. P. Tzamtzi and G. L. Giannaris, "Event-Based Supervisor Control for a Bascule Bridge," *2024 9th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, Athens, Greece, 2024.

56. M. Bashir, J. Zhou and B. B. Muhammad, "Optimal Supervisory Control for Flexible Manufacturing Systems Model With Petri Nets: A Place-Transition Control," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 58566-58578, 2021.
57. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and A. N. Menexis, "Supervisory control for flexibility of production manufacturing processes," *2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Larnaca, Cyprus, 2017, pp. 000169-000174.
58. J. Li, D. Pang, Y. Zheng, X. Guan, and X. Le, "A flexible manufacturing assembly system with deep reinforcement learning," *Control Engineering Practice*, vol. 118, p. 104957, 2022.
59. Y. Lu, Y. Chen, Z. Li and N. Wu, "An Efficient Method of Deadlock Detection and Recovery for Flexible Manufacturing Systems by Resource Flow Graphs," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 1707-1718, 2022.
60. F. N. Koumboulis, D. G. Fragkoulis and G. K. Diveris, "Function supervisors for storage systems," *2018 7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS)*, Thessaloniki, Greece, 2018, pp. 1-4.
61. Y. Fan, J. Yang, J. Chen, P. Hu, X. Wang, J. Xu, and B. Zhou, "A digital-twin visualized architecture for Flexible Manufacturing System," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 60, pp. 176-201, 2021.
62. P. N. Pena, J. N. Vilela, M. R. C. Alves and G. C. Rafael, "Abstraction of the Supervisory Control Solution to Deal With Planning Problems in Manufacturing Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 1, pp. 344-350, 2022.
63. D. Ionescu, A. Filipescu, G. Simion, E. Mincă, D. Cernega, R. Şolea, and A. Filipescu, "Communication and control of an assembly, disassembly and repair flexible manufacturing technology on a mechatronics line assisted by an autonomous robotic system," *Inventions*, vol. 7, no. 2, p. 43, 2022.
64. B. J. C. van Putten, B. van der Sanden, M. Reniers, J. Voeten, and R. Schifferers, "Supervisor synthesis and throughput optimization of partially-controllable manufacturing systems," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 31, pp. 103-135, 2021.
65. H. Kaid, A. Al-Ahmari, Z. Li, and R. Davidrajuh, "Automatic supervisory controller for deadlock control in reconfigurable manufacturing systems with dynamic changes," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5270, 2020.
66. N. Du, H. Hu and M. Zhou, "Robust Deadlock Avoidance and Control of Automated Manufacturing Systems With Assembly Operations Using Petri Nets," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 1961-1975, 2020.
67. E. Spanelli, "Supervisor Control in a cyber-physical system for vehicle flow in the presence of actuators and sensors faults," Master thesis, National and Kapodistrian University of Athens, 2024.
68. G. L. Giannaris, N. D. Kouvakas, F. N. Koumboulis and D. Vouyioukas, "Towards remote control of planar redundant robotic manipulators," *2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Larnaca, Cyprus, 2017, pp. 000231-000236.
69. M. P. Tzamtzi, and F. N. Koumboulis, "Robustness of a robot control scheme for liquid transfer," *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications, Automation and Industrial Electronics*, Edited by T. SOBH ET AL., Springer-Verlag, 154-161, 2008.

70. E. Koh, H. -D. Kim, S. Baek and C. Lee, "A Review on the Applications of Artificial Intelligence (AI) in the Display Industry," *IEEE Open Journal on Immersive Displays*, vol. 1, pp. 165-172, 2024.
71. X. Zhang, Z. Zhong, W. Guan, M. Pan and K. Liang, "Collision-Risk Assessment Model for Teleoperation Robots Considering Acceleration," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 101756-101766, 2024.
72. F. N. Koumboulis, "A unified approach for the common I/O decoupling via measurement output feedback of multi model descriptor and normal systems," *Journal of the Franklin Institute*, 353(16), pp.4253-4279, 2016.