بنى الأحداث

مدخل إلى نظرية التزامن

Event Structures

An Introduction To Concurrency Theory

د. يوسف عربش

منظمة المجتمع العلمي العربي
Arab Scientific Community Organization

بنى الأحداث

مدخل إلى نظرية التزامن

Event Structures

An Introduction To Concurrency Theory

تأليف

د. يوسف عربش

تدقيق علمي

د. إيفا حريقص

تدقيق لغوي

أ. بوران عربش

مؤسسة الربان للدراسات والبحوث
AL-RABBAN Foundation for studies and researches

الناشر

منظمة المجتمع العلمي العربي
Arab Scientific Community Organization

الطبعة الأولى
تاريخ النشر 20 سبتمبر 2021

تم ايداع الكتاب بالترقيم الدولي
ISBN : 978-1-9160764-4-0

عن الكاتب

درس الكاتب Youssef Arbach الهندسة المعلوماتية في جامعة البعث في سوريا وحاز على إجازة منها في هندسة البرمجيات عام 2008.

انتقل بعدها للدراسة في ألمانيا حيث حاز على شهادة الماستر في هندسة النظم البرمجية (Software System Engineering) من جامعة RWTH Aachen عام 2011.

تخصص بعدها في العلوم النظرية للحاسب وتحديدا في نظرية التزامن حيث حاز على شهادة الدكتوراه من جامعة TU Berlin عام 2015. للكاتب عدة أبحاث منشورة في هذا المجال، منها [2 ,4].

انتقل بعدها للعمل في شركات صناعة البرمجيات حيث يترأس فريقا لتطوير نظم الملاحة (Navigation Systems) والأبحاث التطبيقية في إحدى الشركات في مدينة برلين. يسعى الكاتب من خلالها لتوظيف مخزونه العلمي للحصول على منتوجات برمجية عالية الجودة.

شكر خاص

شكر خاص للدكتورة إيفا حريقص على المراجعة العلمية للكتاب ومساهمتها بالمراجعة اللغوية. تعمل الدكتورة حريقص مدرسة في جامعة البعث في سوريا وحاصلة على شهادة دكتوراه في الهندسة المعلوماتية.

شكر خاص للكاتبة بوران عربش على مراجعتها اللغوية للكتاب وإغنائها أسلوب الكتابة بما تملكه من ملكات لغوية. صدر للكاتبة رواية شهيق زفير عام 2019 ورواية زحمة حب عام 2021 نشرتا من قبل وزارة الثقافة السورية.

شكر للمهندس والزميل أكرم دبدوب على تشجيعه والاستشارات التي قدمها لجعل هذا العمل يرى النور.

وأخيرا أشكر عائلتي وزوجتي على الوقت الأسري الثمين الذي ضحيت به لإتمام هذا العمل. شكرا على صبركم. أحبكم…

ملخص

يبحث هذا الكتاب في العلوم النظرية للحوسبة وتحديدا في نظرية التزامن (Concurrency Theory)، حيث يستخدم بنى الأحداث (Event Structures) كنموذج رياضي لدراسة النظم المتزامنة (Concurrent Systems) وخصائصها.

يستعرض الكتاب عددا من بنى الأحداث ويناقش القدرات التعبيرية لكل منها، إلى جانب أمثلة توضيحية. إضافة لذلك ينطوي الكتاب على مقارنة بين هذه البنى المختلفة، ويربطها مع النماذج الأخرى المستخدمة في نظرية التزامن، مثل شبكات بتري (Petri Nets) وجبر المعالجات (Process Algebras).

يهدف الكتاب بتوجهه الرياضي إلى رفع قدرة القارئ على التجريد والذي يعتبر أداة قوية للتحليل من خلال إزالة الغموض عن المسائل المطروحة ومناقشتها بشكل موضوعي، بعيدا عن الهالات التي قد تحيط بها، مما يسهل إيجاد الحلول ويبسطها.

حيث تشكل الصيغ الرياضية المستخدمة في هذا الكتاب الأداة

المثلى لتحقيق هذا الهدف. فهي قادرة على إضفاء الصبغة العلمية على محتوى الكتاب من حيث أنها تبتغي الدقة وتحث على التفكير بشكل علمي دقيق لا يحتمل التأويل.

يتراوح مستوى الكتاب بين المبتدئ والمتوسط، فهو يتجنب التعمق في البراهين الرياضية ليحافظ على انسيابية السرد، في حين أنه يترك المجال للتبحر في تلك البراهين والنظريات من خلال المراجع والأوراق البحثية المذكورة.

وأما عن لغة الكتاب، فتشكل جسرا يربط بين العلوم المكتوبة باللغة الإنكليزية عموما من جهة، وبين اللغة العربية من جهة أخرى. فهو يقوم بترجمة المصطلحات للعربية، ويتعمد ذكر المصطلحات الاصلية بجانبها، إضافة لتلخيصها في نهاية الكتاب، ليترك بذلك الباب مفتوحا للقارئ للتوسع في المراجع الأجنبية مستخدما المصطلحات الأصلية.

أخيرا، تعد جميع محتويات هذا الكتاب تلخيصاً وتبسيطاً إما لأوراق بحثية تم مناقشتها ونشرها في مؤتمرات علمية، أو لأطروحات دكتوراه تم الدفاع عنها ونشرها، كما نرى في قائمة المراجع. فلا يحوي هذا الكتاب على ما هو جديد أو غير مناقش من قبل المختصين، من نظريات واستنتاجات، وذلك توخيا للدقة والأمانة العلميتين.

الفهرس

الباب ١

مقدمة Introduction

١.١ عن التزامن About Concurrency

يُعرّف التزامن (Concurrency) بأنه قدرة المكونات المختلفة لمسألة ما أو برمجية أو خوارزمية على التنفيذ على التوازي، أي بالوقت نفسه أو بشكل متقاطع زمنيا. وبالمقابل فالنظام المتزامن (Concurrent System) هو نظام مؤلف من عدة مكونات يمكن لبعضها أن تنفذ على التوازي. ويقصد بهذه المكونات التعليمات البرمجية في الخوارزميات، والأحداث (Events) أو الأفعال (Actions) عند دراسة مسألة ما. [١]

[١] لا يقصد بالتزامن هنا أنه عملية Synchronization التي قد تحدث في نظم البيانات لجعلها تمتلك نفس الحالة، وإنما تعني التقاطع في زمن التنفيذ.

يمكن للنظم المتزامنة أن تكون على شكل برمجية كما ذكرنا تحوي على بعض الخطوات التي يمكن تنفيذها بشكل متواز. إضافة لذلك، يمكنها أن تكون على شكل نظام موزع مؤلف من عدة حواسيب أو معالجات (Processes)، تقوم عادة بتنفيذ العديد من المهام على التوازي فيما بينها، وهذا ما نراه في شبكة الإنترنت.

وبالمقابل فلا تعني النظم المتزامنة عدم وجود تسلسل في تنفيذ مكوناتها، فقد تحوي على بعض المكونات المعتمدة على بعضها والتي لا يمكن تنفيذها بنفس الوقت. أو قد تحوي على مكونات متضاربة لا يمكن تنفيذ إلا إحداها فقط.

إضافة لذلك، قد تنتج النظم المتزامنة من تركيب (Composition) بضعة برامج أو معالجات (Processes) (قد تكون غير متزامنة) ليتم تنفيذها على التوازي وليتم النظر إليها كنظام متزامن واحد. فمثلا إذا اعتبرنا معالجتين (Two processes) تقوم إحداهما من خلال حلقة لا نهائية بقراءة موقع بالذاكرة وطباعة محتواه على الشاشة، وتقوم الأخرى بملء نفس الموقع في الذاكرة من خلال توليد أرقام عشوائية بحلقة لا نهائية أيضا. يمكن لنا حينها النظر إلى المعالجتين كنظام واحد تقوم إحدى مكوناته بالقراءة والطباعة بينما يقوم المكون الآخر بالكتابة، بحيث تنتظر إحداها الأخرى عند الولوج للذاكرة المشتركة. يمكن هنا لعملية التوليد العشوائي أن تنفذ بالتوازي مع عملية الطباعة، أو على التسلسل، فهما عمليتان متزامنتان (Concurrent).

بالمقابل لا يتشرط التزامن تنفيذ العمليات المتزامنة على التوازي، بل يمكن تنفيذها أيضا بشكل متسلسل. فيجب ألا يؤثر ترتيب تنفيذ المكونات المتزامنة على الناتج النهائي للنظام [21]. ففي مثالنا السابق، يمكن بعد قراءة الذاكرة أن تنفذ عملية الطباعة لتلك القيمة المقروءة متبوعة بعملية توليد عدد عشوائي جديد (دون كتابته بالذاكرة). أو يمكن توليد العدد العشوائي الجديد أولا (دون الكتابة للذاكرة) ثم طباعة العدد

المقروء من الذاكرة، فكلاهما سيؤدي إلى نفس القيمة المطبوعة. ويمكن كما نوهنا تنفيذ تلك العمليتين على التوازي فسنحصل على نفس الناتج أيضا.

فالتزامن يدل على استقلالية الأحداث بحيث أن تلك الأحداث المتزامنة لا ترتبط ببعضها باعتمادية ما أو تضارب مع بعضها البعض بحيث نضطر للاختيار بين أحدها. وبالتالي يمكن تنفيذها على التوازي أو بأي ترتيب كان.

تختص نظرية التزامن بدراسة النظم البرمجية وتحليلها لأجزاء مستقلة عن بعضها البعض يمكن تنفيذها بنفس الوقت، وكذلك لأجزاء أخرى معتمدة على بعضها البعض تنفذ بشكل متسلسل أو أجزاء متنافرة مع بعضها يجب علينا اختيار أحدها للتنفيذ. [٢]

١.٢ الحاجة لأدوات نمذجة رياضية

توفر أدوات النمذجة المعرفة بشكل رياضي أو ما يسمى بالطرائق الصورية (Formal Methods) إمكانية لتوصيف النظم بشكل دقيق لا يقبل التأويل. فتوفر بذلك وسيلة دقيقة للتخاطب بين الفرق المختلفة عند تصميم النظم، بما يجنبنا اختلاف التفسير حول تصميم تلك النظم.

تم تعريف العديد من الأدوات الرياضية والنماذج لدراسة النظم المتزامنة، مثل بنى الأحداثِ (Event Structures) وشبكات بتري (Petri Nets) ونموذج الممثِل (Actor Model)، وجبر المعالجات (Process Algebra)، حيث تعدَ شبكات بتري أقدمها. تم أيضا تعريف

[٢] بينما تختص البرمجة التفرعية بالمقابل بآلية تنفيذ الأجزاء المستقلة أو التي يمكن تنفيذها على التوازي واختيار البنية الحاسوبية الأنسب لذلك التنفيذ.

العديد من أنواع المنطق الزمني (Temporal Logic) لدراسة تلك النظم، مثل المنطق الزمني الخطي (Linear Temporal Logic) ومنطق الشجرة الحسابية (Computational Tree Logic).

فنرى أن بعض نظم الاتصالات قد تم تعريفها من خلال شبكات بتري، لإعطائها معنى دقيق أو دلالة رياضية (Semantics) [12]. وكذلك فقد تم استخدام جبر المعالجات لبناء منصة عمل (Framework) لتصميم خدمات الويب (Web Service) والتحقق من صحتها وخصائصها [16]. إضافة لذلك، فقد تم استخدام بنى الأحداث لنمذجة الألعاب والاستراتيجيات [10].

وكذلك فباستخدام النماذج الرياضية يمكن التحقق من أن النظم المدروسة والمنمذجة بتلك النماذج تخلو من خواص غير مرغوبة، أو تحتوي على خواص معينة في جميع المسارات المحتملة التي قد يسلكها النظام المدروس، وهذا ما نراه في ما يسمى بفحص النماذج (Model Checking) [15].

فيمكن مثلا التحقق من أن الإشارة الحمراء في نظام مرور ما ستتبع بإشارة صفراء بعد فترة زمنية معينة. أو أن الإشارة الحمراء لن تتبع بإشارة خضراء مباشرة دون المرور بإشارة صفراء. إضافة يمكن التحقق عند نمذجة آلية قفل معين مثل السيمافور (Semaphore) بأنه لا يمكن طلب القفل (Lock) مرتين متتاليتين على نفس المنطقة الحرجة (Critical Region) دون المرور بطلب تحرير القفل (Release)، فهذا أمر غير مرغوب.

١.٣ عن بنى الأحداث
Abou Event Structures

تعتبر بنى الأحداث أداة بسيطة للنمذجة حيث إنها تمس الأساسيات كالأحداث والعلاقات بينها، بعيدا عن الحلقات والعودية ...إلخ. فيمكن استخدام بنى الأحداث بنموذجها الرياضي الواضح والمبسط لإعطاء دلالة رياضية لنماذج أخرى مثل جبور العمليات وشبكات بتري. إضافة لذلك، يمكن التعبير عن بنى الأحداث بشكل رسومي بسيط كما سنرى، مما يسهل عملية النمذجة.

١.٣.١ مفهوم الحدث Event

الحدث هو أمر ما يقع بلحظة زمنية معنية. وفي نموذج بنى الأحداث الذي سنتطرق إليه في هذا الكتاب فإن الأحداث لا تتكرر. فإذا كان هناك فعل (Action) معين قابل للتكرار فيتم تمثيله بسلسلة من الأحداث بحيث كل منها يمثل تكرارا أحاديا لهذا الفعل. فمثلا إذا افترضنا أن عملية شراء معينة تتكرر لثلاث مرات، فيتم تمثيلها في بنى الأحداث من خلال ثلاث أحداث متوالية $e_1, e_2, e_3, \ldots$ كل منها يمثل عملية شراء.

١.٣.٢ السببية Causality

عادة ما يكون هناك علاقة اعتمادية أو تسلسل بين الأحداث، فلا يمكن لحدث a يعتمد على آخر b الحدوث قبل ذلك الحدث الآخر b. فلا بد للحدث الذي يعتمد عليه b (المسبِب) من الحدوث أولا.

ونقول هنا عند وقوع الحدث المسبب b بأن الحدث المعتمِد عليه a قد تم تفعيله، أي يمكنه الحدوث فلا مانع من حدوثه.
فمثلا، لا يمكن إرسال المنتج للزبون قبل الدفع والذي بدوره لا يمكن حدوثه قبل الشراء.

$$\text{order} \bullet\!\longrightarrow\!\overset{\text{pay}}{\bullet}\!\longrightarrow\!\bullet\, \text{ship}$$

تسمى هذه العلاقة بالسببية وهي علاقة جوهرية بين الأحداث. وبشكل أدق فإن علاقة السببية هنا لا تعني حتمية وقوع الأحداث التي يتم تفعيلها وإنما تمثل علاقة تفعيل (تمكين) للأحداث. [٣]
أما من منظور علم المنطق (Logic) فيمكن كتابة علاقة السببية في المثال السابق على الشكل $\text{pay} \implies \text{order}$ ما يعني أن الدفع يقتضي بالضرورة وقوع عملية شراء، مما يدل بمعنى آخر على أن عملية الشراء حدث سابق بالضرورة (سبب لازم) لوقوع عملية الدفع.
فبالعودة إلى عملية الشراء المتكررة، وبعد التعرف على علاقة السببية، يمكننا تمثيل مثل تلك الأفعال المتكررة في بنى الأحداث من خلال سلسلة أحداث متوالية $e_1, e_2, e_3, \ldots$ كما ذكرنا، وبحيث يعتمد كل منها سببيا على ما سبقه. وهذا بديهي فلا بد للتكرار الثاني من الفعل ألا يقع إلا بعد التكرار الأول، وهكذا. وأما عن عدد هذه الأحداث، فهذا يعتمد على عدد تكرارات الفعل، فالفعل المكرر بشكل لا منته يتم تمثيله بسلسلة لا منتهية من الأحداث، وهذا ما تسمح به بنى الأحداث. [٤]

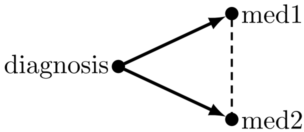
---

[٣] سنرى في الملحق ١.٥ أنه من الممكن تمثيل هذا النوع من الأحداث التي يجب وقوعها عند تفعيلها من خلال تحديد الإطار الزمني لحدوثها.

[٤] للتوسع في هذا الموضوع يمكن الإشارة إلى المراجع [34, 31, 17] للاضطلاع

١.٣.٣ التنافر Conflict

تمثل علاقة التنافر الأحداث المتضاربة والتي وقوع أحدها يجعل من المستحيل وقوع الحدث الآخر المتنافر معه. فمثلا عند تشخيص مرض ما يمكن للطبيب إعطاء أحد دواءين وليس كلاهما.



عادة ما يتم تمثيل التنافر بين الأحداث رسومياً على شكل خط متقطع أما السببية فتمثل من خلال الأسهم. فمثلا نرى فيما يلي مثالا عن علاقة السببية والتنافر مستخدمتان معا، حيث لا يمكن إعطاء أي من الأدوية قبل التشخيص (سببية)، ولا يمكن إعطاء الدواءين للمريض (تنافر).

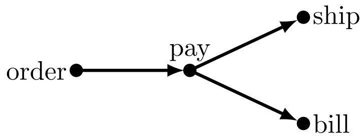
يمكن استخدام علاقة التنافر لتمثيل بنية if/else في البرامج حيث يمكن تنفيذ إما الأحداث التي تلي if أو الأحداث التي تلي else. فالأحداث في الكتلتين على تنافر ولا يمكن تنفيذهما معا.

على عملية بسط شبكات بتري (Petri Nets Unfolding) والتي تسمح بالتكرار وعلى كيفية تمثيلها من خلال بنى الأحداث.

١.٣.٤ الأحداث المستقلة Independent Events

تعتبر الأحداث الغير مرتبطة بعلاقة سببية أو بعلاقة تنافر أحداثاً مستقلة، فلا قيود على تسلسل وقوعها، حيث يمكنها الوقوع بنفس الوقت (Simultaneously) أو يمكن وقوعها حدثا بعد الآخر، ويقال بأنها مورقة (Interleaved).

فمثلا يمكن بعد عملية الشراء والدفع أن تتم عملية إصدار الفاتورة وكذلك عملية الشحن بشكل مستقل أي بنفس الوقت أو بالتتالي.

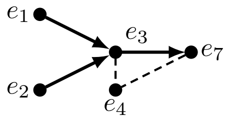


١.٤ بنى الأحداث الأولية
Prime Event Structures

تعتبر بنى الأحداث الأولية (Prime Event Structure) أبسط أنواع بنى الأحداث، فهي تضم علاقة السببية بالدلالة التي عرفناها، مع إمكانية وجود أكثر من مسبب للحدث الواحد والتي يشترط حدوثها جميعا لتفعيل ذلك الحدث. [٥]

---

[٥]سنرى في فصول لاحقة مثالا عن علاقة تنافر غير تناظرية حيث يمكن لحدث أن يستبعد حدثا آخرا ولكن العكس ليس صحيحاً بالضرورة



ففي المثال الموضح أعلاه، إن حدوث كل من e_1, e_2 ضروري لتفعيل e_3.

إضافة لذلك، تشتمل بنى الأحداث الأولية على علاقة تنافر تناظرية، فمثلا يستبعد الحدث e_3 (يتنافر مع) الحدث e_4 وعليه يستبعد الحدث e_4 أيضا (سيكون متنافرا مع) الحدث e_3.

١.٤.١ السببية كعلاقة ترتيب Causality as a Partial Order

إذا كان e_3 لا يمكن حدوثه دون e_2 أو دون e_1 وكان e_7 لا يمكن حدوثه دون e_3 فيمكن الاستنتاج أنه لا يمكن حدوث e_7 دون حدوث كل من e_1 و e_2. وعليه فيمكن القول أن السببية في بنية الأحداث الأولية علاقة متعدية.

تفترض أيضا بنى الأحداث الأولية أن السببية علاقة ضد تناظرية (Anti-symmetric)، أي إذا كان e_3 يعتمد على e_1 فيجب ألا يكون e_1 معتمدا على e_3 وإلا وقعنا بحلقة من الاعتمادية سنتعرف عليها في فصل لاحق تمثل قفلا ميتا (Dead Lock)، ولأصبح كل من الحدثين مستحيلين.

تعتبر هاتان الخاصيتان المقومين الأساسيين لعلاقة الترتيب (الجزئي) والتي تشترط أن تكون ضد تناظرية ومتعدية (Transitive) وانعكاسية (Reflexive). تفترض بنى المعطيات الأولية الخاصية الانعكاسية في السببية وهذا لا يعني أن كل حدث هو معتمد على

نفسه كما سنراه ممكنا في بنى أخرى، وإنما لها معنى مجازي للتماشي مع شروط الترتيب الجزئي.

لا يتم في الأمثلة الرسومية رسم العلاقة المتعدية عادة ولا الانعكاسية فهي تحصيل حاصل ويمكن استنتاجها، بينما يتم رسم الأسهم الخاصة بالسببية المباشرة بين الأحداث المختلفة.

١.٤.٢ وراثة التنافر Conflict Heredity

إذا كان حدوث e_4 يستبعد حدوث e_3 نتيجة التنافر، وكان e_3 ضروريا لحدوث e_7، أفلا يمكن الاستنتاج أن e_4 يستبعد e_7؟ وكأن e_3 و e_5 على تنافر ضمني؟

لجعل هذا التنافر الضمني واضحا، تشترط بنى الأحداث وجود تنافر واضح بين تلك الأحداث، وتسمى بوراثة السببية حيث أن كل حدث يرث التنافرات التي لدى الأحداث المسببة أو المفعلة له.

١.٤.٣ التعريف الرياضي

هناك العديد من التعاريف الرياضية (المتشابهة) لبنى الأحداث الأولية كما في [24 ,34 ,33 ,35] ولكن هنا سنعتمد على التعريف المأخوذ من [35].

Definition 4.1.1. *A* Prime Event Structure (PES) *is a triple* $\pi = (E, \#, \leq)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\# \subseteq E^2$*, an irreflexive symmetric relation (the* conflict *relation)*

- $\leq \subseteq E^2$, *a partial order (the* enabling *relation)*

that additionally satisfies the conflict heredity *and* finite causes *constraints, respectively as follows:*

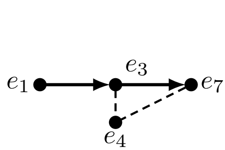
1. $\forall e, e', e'' \in E \,.\, e \# e' \wedge e' \leq e'' \implies e \# e''$
2. $\forall e \in E \,.\, \{e' \in E \mid e' \leq e\}$ *is finite*

تفترض بنى الأحداث الأولية أن تكون مجموعة مسببات حدث ما مجموعة منتهية وهذا ما ينص عليه الشرط الثاني في التعريف، بينما تسمح لمجموعة الأحداث E بحد ذاتها أن تكون غير منتهية، وهذا ما سيمكننا كما سنرى لاحقا من نمذجة بعض الحلقات غير المنتهية من خلال سلسلة غير منتهية من الأحداث.

بالمقابل تشترط بنى الأحداث على علاقة التنافر ألا تكون انعكاسية، أي ألا تحتوي على أحداث متنافرة مع ذاتها، وإلا لأصبحت تلك الأحداث مستحيلة كما سنرى في الفقرة اللاحقة.

وبناء على التعريف السابق يمكن كتابة البنية أدناه بالشكل الرياضي التالي:

$$\pi = \Big(\{e_1, e_3, e_4, e_7\},\ \{(e_1,e_3),(e_3,e_7),(e_1,e_7),(e_1,e_1),(e_3,e_3),(e_7,e_7),(e_4,e_4)\},\ \{(e_3,e_4),(e_7,e_4)\}\Big)$$

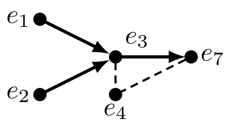


الباب ٢

مفهوم التنفيذ في بنى الأحداث

System Run in Event Structures

٢.١ مفهوم التنفيذ System Run



يمكن في المثال الموضح أعلاه وقوع الحدث e_1 أو e_2 أو كليهما. وإذا كانت هذه الأحداث تمثل خطوات لبرنامج ما فنقول إنه يمكن تنفيذ تلك الأحداث. فبنى الأحداث جميعها كغيرها من نماذج الحوسبة توفر مفهوم التنفيذ (Run) للدلالة على مجموعة الأحداث التي يسمح بتنفيذها وفق القيود المعرفة، والمتمثلة بعلاقة التنافر والسببية ...إلخ. فمثلا $\{e_1, e_3\}$ لا تشكل تنفيذا للنظام (System Run) الممثل بالمثال السابق لأنها تفتقد حدوث e_2 اللازم لحدوث e_3. وكذلك $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ فلا تعتبر تنفيذا أيضا لاحتوائها على أحداث متنافرة.

٢.٢ التشكيل Configuration

يتم تمثيل التنفيذ من خلال عدة أشكال منها ما يخضع لترتيب رياضي ومنها ما لا يخضع. إحدى أبسط هذه الأشكال هو ما يسمى بالتشكيل (Configuration). حيث يعرف التشكيل في بنى الأحداث الأولية على أنه مجموعة من الأحداث C الجزئية من أحداث البنية E بحيث تكون خالية من التنافر، ومن أجل كل حدث في تلك المجموعة فإن جميع مفعلات ذلك الحدث تقع في تلك المجموعة (مغلقة من اليسار على علاقة السببية). أي:

- $C \subseteq E$
- $\forall e_1, e_2 \in C \,.\, \neg e_1 \# e_2$
- $\forall e \in C \,.\, \forall e' \in E \,.\, (e' \leq e \implies e' \in C)$

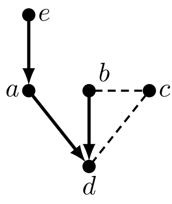
فمثلا نقول أن المجموعة $\{e_1\}$ تمثل تشكيلا في البنية السابقة لأنها خالية من التنافر ولأن e_1 لا يعتمد على غيره من المفعلات او المسببات. بينما لا تمثل المجموعة $\{e_1, e_3\}$ تشكيلا للأسباب التي ذكرناها سابقا.

أما بالنسبة لترتيب وقوع الأحداث، فالتشكيل لا يحوي على أي ترتيب، حيث يمكن استنباط ترتيب وقوع الأحداث من خلال علاقة الترتيب أو السببية المعرفة على مستوى البنية. [1]

أخيرا، نشير إلى مجموعة تشكيلات بنية معينة π بـ $C(\pi)$.

٢.٣ عائلة التشكيلات
Family of Configurations

إن التشكيل يعبر عن تنفيذ ما في نظام ممثل ببنية أحداث. ولكن لا يمكنه أن يري صورة كاملة عن تطور التنفيذ، ابتداء من التشكيل الخالي. ولذلك تم تطوير مفهوم عائلة التشكيلات. فمثلا في البنية التالية:



يمكن اشتقاق التشكيلات التالية:

[1] في بعض بنى الأحداث الأخرى حيث لا يتوفر علاقة ترتيب للأحداث معرفة على مستوى البنية يتم تعريف علاقة ترتيب على مستوى أحداث التشكيل نفسه ليشكل مجموعة مرتبة، كما سنرى في الفصول ٣.٣ و ٤.١.

$$\begin{tikzcd}
 & \{b\} \arrow[r] & \{b,e\} \arrow[r] & \{b,e,a\} \arrow[r] & \{b,e,a,d\} \\
\emptyset \arrow[ur] \arrow[r] \arrow[dr] & \{e\} \arrow[ur] \arrow[r] \arrow[dr] & \{e,a\} \arrow[ur] \arrow[r] & \{e,a,c\} & \\
 & \{c\} \arrow[r] & \{c,e\} \arrow[ur] & &
\end{tikzcd}$$

حيث تسمى البنية السابقة بعائلة تشكيلات. فبالنظر إليها يمكن معرفة ما هي الأحداث التي يمكن أن تقع بعد أحداث أخرى (السببية) وأي من الأحداث لا يمكنه الحدوث أبدا مع أحداث أخرى (التنافر). أما عن الأسهم الرابطة بين التشكيلات فهي ليست سوى علاقة احتواء المجموعات $\subseteq$.

فإذا كانت بنى الأحداث تمثل القواعد التي يمكن للأحداث الوقوع وفقها، فإن عوائل التشكيلات تعبر عما هو ممكن من التشكيلات.

ولكن هل يمكن القول إن أي مجموعة من التشكيلات هي عائلة تشكيلات؟ في الواقع إن لعوائل التشكيلات تعريفها وشروطها الخاصة، فلا يمكن القول عن كل مجموعة من التشكيلات أنها عائلة. فيما يلي تعريف لعوائل التشكيلات كما ورد في [25].

Definition 3.2.1. *A family of configurations is a set $\mathbb{C}$ of configurations satisfying:*

- $\emptyset \in \mathbb{C}$
- $\forall F, G, H \in \mathbb{C} \,.\, F \cup G \subseteq H \implies F \cup G \in \mathbb{C}$
- $\forall F \in \mathbb{C} \,.\, \forall a, b \in F \,.\, a \neq b \implies \exists G \in \mathbb{C} \,.\, G \subseteq F \wedge (a \in G \iff b \notin G)$

حيث تشترط عوائل التشكيلات أن يكون التشكيل الخالي أحد أفراد تلك العائلة. فهذا يضمن أنه يمكن ابتداء التنفيذ من اللا

شيء. إضافة، عند وجود تشكيلين F, G وتشكيل ثالث يضمهما $F \cup G \subseteq H$ في نفس العائلة، يجب أن يكون $F \cup G$ تشكيلا في تلك العائلة. فمثلا في المثال السابق إذا نظرنا للتشكيلين $\{c\}, \{e\}$ والتشكيل $\{e, a, c\}$ نرى أن التشكيل $\{e, c\}$ متواجد ضمن تلك العائلة. فبدون هذا التشكيل لن تكون مجموعة التشكيلات تلك عائلة تشكيلات. أما الشرط الأخير هو أنه من أجل أي حدثين $a \neq b$ من تشكيل معين F يجب أن يكون هنلك تشكيل جزئي $G \subseteq F$ في نفس العائلة، يحوي الحدث b ولا يحوي a، أو العكس. يعبر هذا الشرط عن أنه لا يوجد حدثين يتم تنفيذهما سوية دون إمكانية تنفيذ أحدهما بمفرده.

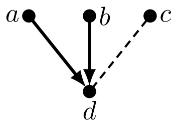
بالمقابل فليس من الضروري أن تحتوي عائلة التشكيلات على جميع تشكيلات البنية، فمجموعة التشكيلات $\{\emptyset, \{b\}, \{c\}\}$ تعتبر عائلة لأنها تستوفي الشروط المذكورة وكذلك المجموعتين $\{\emptyset, \{b\}\}$ و $\{\emptyset\}$.

تعطي عوائل التشكيلات الدلالة الرياضية لبنية أحداث ما (وبالذات البنى الأولية)، وسنستخدمها لاحقا للمقارنة بين أنواع بنى الأحداث المختلفة وقدراتها التعبيرية (Expressive Power). ولكن سنرى فيما بعد بنى أخرى للأحداث لا يمكن إعطاء الدلالة لها من خلال عوائل التشكيلات، والتي لن تكون قادرة على التعبير على التنفيذات الممكنة بدقة. عندها سنكون بحاجة لنماذج تمتلك قدرة تعبيرية أكبر.

لقد تم البرهان في [34] أنه إذا تساوت عائلات التشكيل لبنيتين أوليتين، فالبنيتين متساويتين بالضرورة (من حيث الأحداث والارتباطات السببية والتنافرية)، وأن العكس صحيح أيضا.

٢.٤ الأثر Trace

الأثر هو تسلسل للأحداث، يمثل تنفيذا معينا. فيمكن اعتباره على أنه اشتقاق من تشكيل معين لتسلسل من الأحداث، وهذا ما يعرف بالـ (Linearization).



فمثلا إن التسلسل a, b, d هو أثر في البنية الموضحة أعلاه، يمثل تنفيذا تسلسليا للأحداث. [٢] يمكن تصور الأثر كما لو أن بحوزتنا حاسبا بمعالج واحد، عليه أن ينفذ الأحداث الموجودة في التشكيل $\{a, b, d\}$ فيقوم بتنفيذها بالتسلسل a, b, d أو بالتسلسل b, a, d والذي يعتبر أيضا أثرا في نفس البنية. بالمقابل لا يمكن تنفيذ أحداث التشكيل $\{a, b, d\}$ هذا بتسلسل لا ينتهي بـ d لأن ذلك لا يمثل أثرا في البنية السابقة، فعلى الأثر أن يحترم العلاقات المعرفة في البنية. والتسلسلات التي لا تنتهي بـ d لا تحترم علاقة السببية في البنية السابقة والتي تنص على وجوب وقوع المسببات أولاً. وعليه فلا يمكن للأثر أن يحوي على أحداث متنافرة. إضافة لذلك، ليس من الضروري أن يكون الأثر شاملا لجميع أحداث البنية، فالتسلسل a هو أثر في البنية السابقة، وكذلك b و a, b, c.

رياضيا، يمكن تعريف الأثر في بنية أحداث أولية $\pi = (E, \#, \leq)$

---

[٢] تُكتَب الآثار عموما وفي هذا الكتاب تحديدا على شكل تسلسل من الأحداث يبتدئ من اليسار لليمين

على أنه تسلسل من الأحداث $\sigma = e_1, \ldots, e_n$ بحيث:

- $\{e_1, \ldots, e_n\} \subseteq E$
- $\forall e, e' \in \{e_1, \ldots, e_n\} \,.\, \neg(e \# e')$
- $\forall e \in E, i \leq n \,.\, (e \leq e_i \implies e \in \{e_1, \ldots, e_i\})$

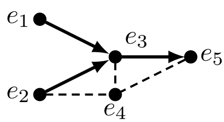
قصور الآثار: لا يمكن للأثر أن يري تنفيذ الأحداث (المستقلة) بشكل يتقاطع زمنيا أو أن الأحداث تنفذ بذات الوقت، وإنما بالتتالي. فمثلا لا يرتبط الحدثان a, b في المثال السابق بعلاقة سببية أو تنافرية، ولكن يسبق أحدهما الآخر في الأمثلة السابقة.

فالأحداث المستقلة يمكن تنفيذها بأي ترتيب كان في الآثار. وعليه فالفروق بين الآثار التي تنتمي لنفس التشكيل تنجم في الواقع عن اختلاف ترتيب الأحداث المستقلة فيها، كالأثرين a, b, d و b, a, d.

٢.٥ مفهوم باقي البنية

Remainder of an Event Structure

لنفترض البنية التالية، ولنتخيل حدوث التشكيل $\{e_1, e_2\}$ منها، فما الذي يمكن تنفيذه بعد ذلك؟



في الواقع يسمى هذا المفهوم بباقي البنية (Remainder)، حيث إن باقي البنية السابقة بعد التشكيل $\{e_1, e_2\}$ هو:

$$e_3 \bullet\!\!\longrightarrow\!\!\bullet e_5$$

حيث نرى أن البنية السابقة تشمل فقط ما تبقى من الأحداث القابلة للتنفيذ، فهي لا تحوي أحداث التشكيل $\{e_1, e_2\}$ نفسه، ولا تحوي الأحداث المتنافرة معها كالحدث e_4 الذي تم استبعاده. إضافة لذلك، فالحدث e_3 هو حدث مفعل بداية (Initially Enabled) لأن مفعلاته قد وقعت مسبقا.

أما بالنسبة للباقي من البنية الأصلية نفسها بعد التشكيل $\{e_1, e_4\}$ فهو البنية الخالية.

بشكل عام، إن باقي البنية بعد تشكيل C هو بنية لو أُخذَ اجتماع كل تشكيل فيها C' مع C أي $C \cup C'$ لكان هذا الاجتماعَ تشكيلا من البنية الأصلية. فمثلا لو أخذنا اجتماع التشكيل $\{e_3\}$ في الباقي بعد $\{e_1, e_2\}$ مع التشكيل $\{e_1, e_2\}$ نفسه لحصلنا على المجموعة $\{e_1, e_2, e_3\}$ التي هي تشكيل في البنية الأصلية.

باختصار فإنه يمكن الابتداء بتنفيذ الأحداث في البنية الباقية بعد تشكيل C كما لو أننا نتابع تنفيذ الأحداث في البنية الأصلية بعد C. وعليه فمن البديهي أن لا تشكل البنية التالية باقيا للبنية الأصيلة بعد التشكيل $\{e_1, e_2\}$ لأنه يمكن فيها الحصول على التشكيل $\{e_5\}$ بينما $\{e_1, e_2, e_5\}$ ليست تشكيلا في البنية الأصلية.

$$e_3 \bullet \qquad \bullet e_5$$

بالمقابل فالبنية الحاوية على الحدث الوحيد e_3 ليست بباق بعد $\{e_1, e_2\}$ لأنها لا تعطي التشكيل $\{e_3, e_5\}$ بينما المجموعة

$\{e_1, e_2, e_3, e_5\}$ تعتبر تشكيلا في البنية الأصلية. فباختصار لا يمكن إضافة تنافرات جديدة ولا يمكن إزالة تنافرات موجودة في البنية الأصلية عند أخذ الباقي بعد تشكيل ما C. وينطبق هذا أيضا على السببية. وكذلك لا يمكن إضافة أحداث جديدة للبنية الأصلية في الباقي، ولا إسقاط أحداث غير أحداث التشكيل C نفسه أو المتنافرة معه.

يمكننا بعد هذه الأمثلة والشروح التعرف على التعريف الرياضي لباقي بنية أولية بعد تشكيل ما، كما ورد في [1]:

Definition 5.2.1. *Let* $\pi = (E, \#, \leq)$ *be a PES, and let* $H \in \mathrm{C}(\pi)$ *be a configuration of* π. *The remainder of* π *after* H *is* $\pi[H] = (E', \#', \leq')$, *where:*

- $E' = E \setminus \big(H \cup \{e \mid \exists e' \in H \,.\, e\#e'\}\big)$
- $\#' = \# \cap E'^2$
- $\leq' = \leq \cap E'^2$

فمجموعة أحداث الباقي تستثني أحداث التشكيل H وكل حدث يتعارض مع أحد أحداث H فقط. أما علاقة التنافر والسببية فهي إسقاط لعلاقتي التنافر والسببية الأصليتان على مجموعة الأحداث الجديدة الجزئية من الأصلية، أي هما العلاقتان الأصليتان مع إسقاط الثنائيات التي لا ينتمي أحد طرفيها لمجموعة الأحداث الجديدة، دون زيادة أو نقصان كما ذكرنا سابقا، حتى يتم التطابق في التنفيذ بين البنية الأصلية والباقي.

يمكن البرهان كما ورد في [1] أن باقي بنية أولية كما رأيناه في التعريف السابق هو بنية أولية أيضا. فكما رأينا في التعريف الرياضي للبنية الأولية أن هناك شروطا يجب توافرها حتى نقول عن بنية أنها أولية. فبما أن علاقة التنافر الأصلية هي تناظرية وغير انعكاسية فإسقاطها على مجموعة جزئية E' من مجموعة الأحداث E سيعطي علاقة تناظرية وغير انعكاسية حتما. وبالمثل

يمكن الاستنتاج أن علاقة السببية في الباقي هي ترتيب جزئي، وأن الباقي يحافظ على خاصية وراثة التنافر، وأن مسببات الأحداث فيه تشكل مجموعات منتهية.

كما أن المبرهنة التالية كما ورد برهانها في [1] تثبت تطابق متابعة التنفيذ في البنية الأصلية من جهة مع ابتداء التنفيذ في باقي البنية من جهة أخرى:

Lemma 5.2.2. *Let* π *be a PES, let* $H \in \mathrm{C}(\pi)$. *Then:*

$$\forall C \subseteq E \setminus H \,.\, \big(C \in \mathrm{C}(\pi[H]) \iff H \cup C \in \mathrm{C}(\pi)\big).$$

الباب ٣

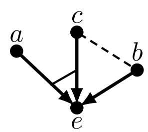
البدائل السببية
Alternative Enablers

٣.١ بنى الأحداث المستقرة Stable Event Structures

لا تعطي بنى الأحداث الأولية خيارات في تفعيل الأحداث فلا يمكن من خلالها نمذجة حدث معين يمكن تفعيله من خلال حدث a أو حدث b. وللتغلب على هذه المحدودية، قام Glynn Winskel في [34, 35] بتعريف نموذج آخر من بنى الأحداث، يدعى بنى الأحداث المستقرة (Stable Event Structures). في هذه البنية يمكن لحدث

أن يتفعل من خلال عدة مجموعات من الأحداث حيث يكفي وقوع أحداث واحدة من هذه المجموعات فقط لتفعيل الحدث الأصلي. ويمكن أن تكون تلك المجموعات أيضا عبارة عن مجموعات وحيدة العنصر.

فمثلا يمكن لحدث e أن يتفعل من خلال وقوع الحدث b أو من خلال وقوع الحدثين a, c. يمكن تمثيل هذا المثال رسوميا بالشكل التالي:



شكل 3.1: مثال عن بنية أحداث مستقرة

ومنه يمكن اشتقاق التشكيلات: $\{a\}$، $\{c\}$، $\{b\}$، $\{a, c\}$، $\{a, b\}$، $\{a, c, e\}$، $\{b, e\}$، $\{a, b, e\}$.

٣.١.١ مفهوم الاستقرار والوضوح السببي Stability and Causal Unambiguity

تفرض بنى الأحداث المستقرة شرطا سنراه في التعريف الرياضي يدعى بالاستقرار (Stability) يؤدي إلى حالة تعرف بالوضوح السببي (Causal Unambiguity) كما تسميه بعض المصادر الأخرى [23]، يجب فيه على كل مجموعتين مسببتين لحدث ما ألا تخلوان من التنافر.

بتعبير أدق، يجب أن يتواجد على الأقل حدث من المجموعة الأولى بحيث يكون على تنافر مع حدث من المجموعة الثانية. هذا ما نراه في المثال السابق من خلال التنافر بين الحدثين c, b.

يمكن في البنية السابقة أن يكون الحدث b على تنافر مع الحدث a بدلا من الحدث c أو مع كليهما وهذا ما يتوافق أيضا مع شرط الاستقرار. أما ما ليس مقبولا هو أن تكون تلك الأحداث الثلاثة خالية من أي تنافر، فتلك البنية لن تكون بنية مستقرة.

لقد تم فرض هذا النوع من التنافر حتى تكون الأحداث التي فعّلت الحدث e واضحة عندها. أما عند عدم وجود مثل ذلك الشرط فسيكون من الممكن اشتقاق التشكيل $\{a, b, c, e\}$ وعندها لن يكون من الواضح تحديد أي من الأحداث قد فعلت الحدث e، خصوصا أن الأحداث a, b, c هي أحداث مستقلة ويمكن أن تقع بنفس اللحظة!

بما أن بنى الأحداث تهدف لتقديم نموذج يوضح العلاقات السببية بين الأحداث، قامت كثير من بنى الأحداث كالبنى الرزمية في ٣.٢ والبنى المستقرة بإضافة مثل ذلك الشرط حيث تم تسمية البنى المستقرة تيمنا به. فمثل تلك البنى تسعى لتبسيط العلاقة السببية والحد من الغموض فيها والذي يدعى في هذه الحالة بالغموض السببي (Causal Ambiguity).

يمثل هذا التفعيل علاقة XOR بين المفعلين وليس علاقة OR، فإما أن يقع الحدثان a, c لتفعيل e أو أن يقع الحدث b ولكن علاقة التنافر تجعل من المستحيل وقوع الأحداث a, b, c.

وبناء عليه يمكن عند النظر للتشكيل $\{a, c, e\}$ القول أن الحدث e قد تفعل بوقوع الحدثين a, c. وحتى في التشكيل $\{a, b, e\}$ فيمكن القول أن الحدث e قد تفعل بوقوع الحدث b وليس a لعدم وقوع الحدث الثاني في مجموعة الحدث a، أي الحدث c.

بشكل عام ومن ناحية المنطق، تتبع بنى الأحداث المستقرة الشكل المعياري الفصلي (Disjunctive Normal Form) في تفعيل

الأحداث، حيث تكون العلاقة $\wedge$ من الداخل، وأما العلاقة $\vee$ فمن الخارج. فمثلا يمكن كتابة علاقة التفعيل (دون أخذ التنافر بعين الاعتبار) في المثال السابق للحدث e على الشكل $(b) \vee (a \wedge c) \implies e$ وأما مع أخذ التنافر بعين الاعتبار فيكتب هذا التفعيل على الشكل $e \implies (a \wedge c \wedge \neg b) \vee (b \wedge \neg c)$.

٣.١.٢ التعريف الرياضي

يمكن تعريف البنية المستقرة على الشكل التالي. ويعتبر هذا التعريف شكلا مبسطا للتعريف الأصلي وقد ورد في [19].

Definition 1.3.1. *A* Stable Event Structure (Stable ES) *is a triple* $\kappa = (E, \#, \vdash)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\# \subseteq E^2$*, an irreflexive symmetric relation (the* conflict *relation)*
- $\vdash \subseteq \mathcal{P}_{fin}(E) \times E$*, the* enabling *relation*

that additionally satisfies for all $F, G \subseteq E$ *and* $e \in E$*:*

- ***Consistency:***

$$F \vdash e \Rightarrow F \textit{ is conflict free, i.e. } \forall e', e'' \in F \,.\, \neg(e' \# e'')$$

- ***Stability:***

$$(F \vdash e \wedge G \vdash e \wedge F \cup G \cup \{e\} \textit{ is conflict free}) \implies F \cap G \vdash e$$

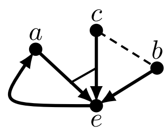
حيث يحتوي التعريف إضافة إلى شرط الاستقرار على شرط التناسق (Consistency) والذي ينص على عدم وجود تنافر بين

أحداث المجموعة المفعلة لحدث ما مثل a وc في مثالنا السابق، وذلك لأن مفهوم التشكيل في البنى المستقرة يشترط على أنه من أجل تنفيذ حدث ما e فإن جميع أحداث إحدى المجموعات المفعلة للحدث e يجب وقوعها. وهذا مستحيل في حال حدوث تنافر بين أحداث المجموعة الواحدة، مما سيجعل الحدث e حدثا مستحيلا.

يعرف التشكيل C في بنية أحداث مستقرة $\kappa = (E, \#, \vdash)$ على أنه مجموعة من الأحداث $C \subseteq E$ خالية من التنافر $\forall e', e'' \in C \,.\, \neg(e' \# e'')$ ومؤمنة (Secured) أي:

$$\forall e \in C \,.\, \exists e_1, \dots, e_n \in C \,.$$
$$(e_n = e \wedge \forall i \,.\, \exists X \subseteq \{e_1, \dots, e_{i-1}\} \,.\, X \vdash e_i)$$

يمنع مفهوم التأمين وقوع الأحداث التي تنتمي لحلقة سببية.

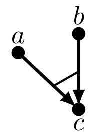


فالمجموعة $\{a, c, e\}$ لا تعتبر تشكيلا في هذه البنية لأنها غير مؤمنة، أي لا يمكننا إيجاد تسلسل أحداث من هذه المجموعة يكون فيه كل حدث مفعل بما يسبقه. فإذا فرضنا التسلسل a, c, e فسنجد الحدث a غير مفعل لأنه يعتمد على مجموعة وحيدة العنصر فيها الحدث e لا يسبق الحدث a في هذا التسلسل. وإذا اعتمدنا التسلسل e, c, a فسنقع في نفس المشكلة بالنسبة للحدث e المعتمد على a والذي يليه في التسلسل.

إن مفهوم التسلسل ضروري في البنى التي لا تكون فيها السببية عبارة عن علاقة ترتيب، فعلاقة الترتيب تلغي وجود الحلقات، حيث سنرى هذه المفهوم أيضا في بنى الأحداث الرزمية.

٣.١.٣ مفهوم التجذر Rooting

من تعريف التشكيل في البنية المستقرة نجد أنه من أجل أي حدث e في ذلك التشكيل يجب توافر مجموعة جزئية من الأحداث X في ذلك التشكيل بحيث $X \vdash e$. وهذا ينطبق على جميع أحداث البنية، مثل البنية التالية.



ففي التشكيل $\{a, b, c\}$ بالنسبة للحدث c هنالك مجموعة جزئية هي $\{a, b\}$ تفعل الحدث c.

ولكن ماذا من أجل الحديثين a, b، ما هي المجموعات المفعلة لها في ذلك التشكيل؟ في الواقع، يعتمد هذا على العلاقة $\vdash$ في تلك البنية. فإذا كانت علاقة التفعيل معرفة على الشكل $\vdash = \{(\{a, b\}, c)\}$ فلن يوجد أي مجموعة جزئية من أي تشكيل من شأنها أن تفعل a أو b.

بينما إذا كانت $\vdash = \{(\{a, b\}, c), (\emptyset, a), (\emptyset, b)\}$ فنجد عندها المجموعة الخالية مفعلة لكل من a و b ويقال عن هذين الحدثين أنهما متجذران (Rooted).

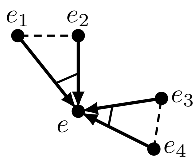
وفي واقع الأمر، سيصبح الحدثان a و b مستحيلين دون هذا التجذر. فالأحداث التي لا يُرسم لها مجموعة مفعلة عليها أن تعرف رياضيا على أنها مفعلة بالخالية، ولكن يتم إسقاط هذا التجذر رسوميا للسهولة، فيمكن القول عنها أنها تفعيلات ضمنية.

٣.١.٤ القوة التعبيرية Expressive Power

من الواضح أن هنالك أمثلة يمكن كتابتها ببنى الأحداث المستقرة ولا يمكن كتابتها ببنى الأحداث الأولية بحيث تعطي كل منهما نفس عائلة التشكيلات. لذلك فقد تم البرهان في [8] على أن بنى الأحداث المستقرة أكثر تعبيرا من بنى الأحداث الأولية وذلك من منظور عوائل التشكيلات.

٣.٢ بنى الأحداث الرزمية
Bundle Event Structures

تم تطوير بنى الأحداث الرزمية من قبل Langerak في [22]، وتحتوي على علاقة تنافر تناظرية وغير انعكاسية كما في بنى الأحداث الأولية. أما بالنسبة لعلاقة السببية فكل حدث يمكن أن يرتبط بأكثر من مجموعة أحداث، بحيث أن وقوع هذا الحدث يشترط وقوع حدث واحد من كل مجموعة يرتبط بها ذلك الحدث. مثال:



فالحدث e يرتبط بمجموعتين $\{e_1, e_2\}$ و $\{e_3, e_4\}$ حيث يسمى الحدث e مع المجموعة $\{e_1, e_2\}$ بالرزمة (Bundle)، وكذلك

الحدث e مع $\{e_3, e_4\}$.

فالبنى الرزمية تعطي مرونة في تفعيل الأحداث، فمثلا من أجل تفعيل الحدث e يجب وقوع أي من المجموعات التالية: $\{e_1, e_3\}, \{e_1, e_4\}, \{e_2, e_3\}, \{e_2, e_4\}$.

تشترط بنى الأحداث الرزمية شرط الاستقرار للوضوح السببي كما في البنى المستقرة على شكل تنافر بين أحداث المجموعة الواحدة في الرزمة، مثل التنافر بين e_1, e_2 وكذلك e_3, e_4.

ومن منظور منطقي تتبع بنى الأحداث الرزمية الشكل المعياري الوصلي (Conjunctive Normal Form) حيث تكون علاقة $\vee$ من الداخل بينما تكون علاقة $\wedge$ من الخارج. فمثلا يمكن كتابة تفعيل الحدث e في المثال السابق (دون أخذ التنافرات بعين الاعتبار) كمايلي: $e \implies (e_1 \vee e_2) \wedge (e_3 \vee e_4)$ وبأخذ التنافر بعين الاعتبار تصبح على الشكل التالي: $e \implies (e_1 \oplus e_2) \wedge (e_3 \oplus e_4)$ أي:

٣.٢.١ التعريف الرياضي

تعرف بنى الأحداث الرزمية كما ورد في [22] على الشكل التالي:

Definition 2.3.1. *A* Bundle Event Structure (BES) *is a triple* $\beta = (E, \#, \mapsto)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\# \subseteq E^2$*, an irreflexive symmetric relation (the* conflict *relation)*
- $\mapsto \subseteq \mathcal{P}(E) \times E$*, the* enabling *relation*

that additionally satisfies the stability *constraint:*

$$\forall X \subseteq E \,.\, \forall e \in E \,.\, X \mapsto e \implies (\forall e_1, e_2 \in X \,.\, e_1 \neq e_2 \implies e_1 \# e_2)$$

أما الأثر في بنى الأحداث الرزمية فيعرف علىِ أنه تسلسل من الأحداث خال من التنافر يكون فيه كل حدث مفعل بما يسبقه من أحداث. لتعريف ذلك رياضيا، نستعين بتعريف مجموعة الأحداث المفعلة بتسلسل ما، كما يلي:

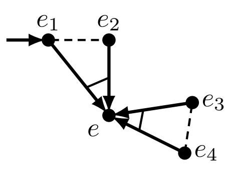
Definition 2.3.2. *Let $\beta = (E, \#, \mapsto)$ be a BES, and let $\sigma = e_1, \ldots, e_n$ be a sequence of events and $\bar{\sigma} = \{e_1, \ldots, e_n\}$ such that $\bar{\sigma} \subseteq E$. We use $\mathrm{en}_\beta(\sigma)$ to refer to the set of events enabled by σ:*

$$\begin{aligned}\mathrm{en}_\beta(\sigma) \ :=\ \big\{e \in (E \setminus \bar{\sigma}) \mid (\nexists e' \in \bar{\sigma} \,.\, e\#e') \ \wedge \\ (\forall X \subseteq E \,.\, X \mapsto e \implies X \cap \bar{\sigma} \neq \emptyset)\big\}\end{aligned}$$

Then the sequence $\sigma = e_1, \ldots, e_n$ is called a trace *of β iff:*

$$\forall i \leq n \,.\, e_i \in \mathrm{en}_\beta(\sigma_{i-1}) \textit{ where } \sigma_{i-1} = e_1, \ldots, e_{i-1}$$

بناء على هذا التعريف نجد أنه إذا كانت المجموعة الخالية مفعلة لحدث ما (تشكل رزمة معه) فسيصبح ذلك الحدث مستحيلا. فالتعريف ينص على أنه من أجل تفعيل حدث ما e يجب أن يقع حدث من كل رزمة للحدث e. فإذا لم يكن لحدث ما رزم مفعلة يكون قد تم استيفاء الشرط، لأنه لا يمكن إيجاد رزمة لذلك الحدث لم يقع منها حدث ما. أما الحدث صاحب رزمة ذات مجموعة خالية فسيكون مستحيلا كما ذكرنا ويمثل كالحدث e_1 في المثال التالي:



أما بالنسبة للتشكيلات، فيقال عن مجموعة من الأحداث أنها تشكيل في بنية رزمية إذا أمكن إيجاد أثر في نفس البنية مؤلف من أحداث تلك المجموعة. بتعبير آخر يمكن القول عن مجموعة من الأحداث على أنها تشكيل في بنية رزمية إذا أمكن كتابتها على شكل تسلسل من الأحداث يكون أثرا في تلك البنية.

كما في بنى الأحداث المستقلة فإن تعريف التشكيل بالاعتماد على مفهوم الأثر يمكّن من تجنب المجموعات الحاوية على حلقات سببية (Causality Cycles).

أخيرا نشير إلى مجموعة آثار بنية رزمية β بالرمز $\mathrm{T}(\beta)$ وإلى مجموعة تشكيلات تلك البنية بالرمز $\mathrm{C}(\beta)$. فقد تم البرهان في [22] أنه إذا تساوت تشكيلات أي بنيتين β_1, β_2 فسوف تتساوى آثارهما، والعكس صحيح. أي:

$$\mathrm{T}(\beta) = \mathrm{T}(\beta') \iff \mathrm{C}(\beta) = \mathrm{C}(\beta') \qquad (٣.١)$$

٣.٢.٢ القوة التعبيرية

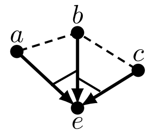
إن بنى الأحداث الرزمية أكثر تعبيرا من بنى الأحداث الأولية (من ناحية التشكيلات الناجمة وعوائلها) وذلك لعدم قدرة بنى الأحداث الأولية على إعطاء الخيارات في تفعيل الأحداث.

تحويل البنى الرزمية لمستقرة

أما بالنسبة لبنى الأحداث المستقرة فيمكن من أجل أي بنية رزمية إيجاد بنية مستقرة بنفس الأحداث قادرة على إعطاء نفس عوائل التشكيلات للبنية الرزمية تلك. وهذا ما تم برهانه في [8]. يمكن القيام بذلك من خلال التحويل من الشكل المعياري الوصلي إلى

الشكل المعياري الفصلي، مع المحافظة على علاقة التنافر كما هي.

وبالمقابل فلا يمكن إيجاد بنية رزمية لكل بنية مستقرة بحيث تكافئها بعوائل التشكيلات، فإذا أخذنا على سبيل المثال البنية المستقرة في الشكل أدناه وحاولنا إيجاد بنية شبيهة لها بنفس الأحداث وعلاقات التفعيل، سنحصل على البنية الرزمية التالية، ولكننا سنضطر لإضافة تنافر إضافي $a\#c$ كما يشترط تعريف البنى الرزمية. وهذا لن ينتج بالتالي نفس تشكيلات البنية المستقرة.



وعليه فالبنى المستقرة أكثر قدرة تعبيرية من بنى الأحداث الرزمية. والسبب باختصار هو أن البنى الرزمية تفترض تنافرا بين كل زوج من الأحداث في كل رزمة، بينما يكفي في البنى المستقرة وجود تنافر واحد على الاقل بين كل مجموعتين مفعلتين لحدث ما.

٣.٣ المجموعة المرتبة جزئيا
Partially Ordered Set (Poset)

بما أنه تم إسقاط مفهوم الترتيب الجزئي من علاقة السببية في البنى المستقلة والرزمية، فلا بد من إيجاد مفهوم أو ترتيب قادر

على التعبير عن تنفيذ الأحداث (المستقلة) بنفس الوقت، وذلك لأن بنى الأحداث بشكل عام تعتبر نموذجا حقيقيا للتزامن كما ذكرنا. فلا يمكن للآثار التعبير عن تزامن الأحداث إلا من خلال اختلاف ترتيبها كما رأينا.

كحلٍّ لعدم وجود علاقة ترتيب جزئي على مستوى العلاقة يمكن اشتقاق تراتيب جزئية على مستوى التنفيذ أو التشكيلات. عندها سنحصل على مجموعات (تشكيلات) مرتبة جزئيا (Partially Ordered Sets) أو اختصارا (Posets)، تمثل تنفيذا للنظام المنمذج. حيث يمثل الترتيب هنا ترتيب تنفيذ تلك الأحداث في المجموعة (التشكيل). وبما أن المجموعات المرتبة تُعرّف على أحداث التشكيلات، فسوف تحترم هذه المجموعات المرتبة علاقة التنافر وتخلو بالتالي من أي أحداث متنافرة.

يمكن في البنى الرزمية تعريف المجموعة المرتبة على أنها ثنائية من تشكيل و علاقة ترتيب، كما يلي:

Definition 3.3.1. *Let* $\beta = (E, \#, \mapsto)$ *be a BES and* $C \in \mathrm{C}(\beta)$, *and* $e, e' \in C$. *Then* $e \prec_C e'$ *if* $\exists X \subseteq E \,.\, e \in X \wedge X \mapsto e'$. *Let* $\leq_C$ *be the reflexive and transitive closure of* $\prec_C$.

حيث يكون حدث ما e سابق لحدث e' إذا كان هنالك رزمة $X \vdash e'$ بحيث $e \in X$. وهنا يجب على العلاقة المعرفة أن تكون انعكاسية ومتعدية حتى تكون ترتيبا جزئيا، فالعلاقة $\prec_C$ المشتقة من علاقة التفعيل ليست انعكاسية أو متعدية بالضرورة.

إن تحقيق هاتين الخاصيتين ممكن من خلال تعريف علاقة جديدة $\leq_C$ تحوي كل ارتباطات (أزواج) العلاقة $\prec_C$ ومن ثم إضافة الارتباطات المتعدية والانعكاسية لهذه العلاقة.

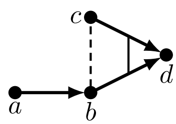
فمثلا من أجل كل عنصر e في التشكيل C نقوم بإضافة الزوج (e, e) للعلاقة $\leq_C$ أي نجعل $e \leq_C e$ ومن أجل كل ارتباط $e \leq_C e' \leq_C e''$ نضيف الزوج (e, e'').

ولكن ما يبقى هو إثبات أن العلاقة $\leq_C$ ضد تناظرية. أي بالنسبة لأي حدثين $e \neq e'$ في المجموعة C فإذا كان $e \leq_C e'$ فإن $e' \leq_C e$ غير صحيحة.

لقد تم في [22] إثبات تلك الخاصية وبالتالي أن $\leq_C$ هي علاقة ترتيب جزئي. وهذا ما يمكن استنباطه طبعا من كون العلاقة $\leq_C$ معرفة على تشكيل من تشكيلات المجموعة والذي بدوره معرف على أثر يجعل من المستحيل وجود حلقات كما ذكرنا. ما يلغي حالة التناظرية التي ليست إلا حلقة ثنائية.

كمثال، يمكن اشتقاق المجموعات المرتبة التالية من البنية الرزمية الموضحة أدناه:

$$(\emptyset, \emptyset)\ ,\ \boxed{a},\ \boxed{c},\ \boxed{a \longrightarrow b},\ \boxed{\begin{array}{c} a \\ c \end{array}},\ \boxed{a \longrightarrow b \longrightarrow d},\ \boxed{c \longrightarrow d},\ \boxed{\begin{array}{c} a \\ c \longrightarrow d \end{array}}$$



تعتبر المجموعات المرتبة جزئيا تعميما للآثار، حيث يمكن اختزال الأثرين c, a, d و a, c, d من البنية السابقة بالمجموعة المرتبة المذكورة بأقصى اليمين. فعند كتابة أحداث هذه المجموعة بشكل خطي (Linear) بما يحافظ على ترتيبها الأصلي، سنحصل على الآثار المذكورة.

أخيرا يشار إلى مجموعة المجموعات المرتبة جزئيا في بنية رزمية β بالرمز $\mathrm{P}(\beta)$. فقد تم البرهان في [22] أنه من أجل بنيتين β_1, β_2 إذا تساوت تشكيلاتهما فسوف تتساوى مجموعاتهما المرتبة، والعكس صحيح. أي:

$$\mathrm{P}(\beta) = \mathrm{P}(\beta') \iff \mathrm{C}(\beta) = \mathrm{C}(\beta') \qquad (٣.٢)$$

٣.٤ عائلة المجموعات المرتبة جزئيا Family of Posets

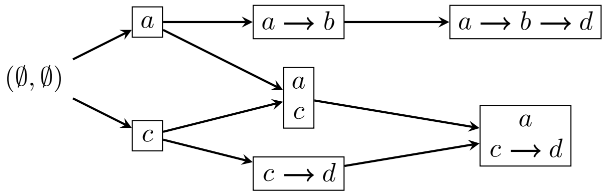
يمكن ربط المجموعات المرتبة الناجمة عن بنية ما بعلاقة بحيث تشكل عوائل من المجموعات المرتبة، بشكل مماثل للتشكيلات وعوائلها. ولكن على خلاف عوائل التشكيلات فالعلاقة بين المجموعات المرتبة لن تكون ببساطة علاقة الاحتواء $\subseteq$ وإنما علاقة أكثر تعقيدا تعبر عن آلية الانتقال من مجموعة مرتبة (تنفيذ) لأخرى.

تدعى علاقة الربط في عوائل المجموعات المرتبة بعلاقة البادئة (Prefix). حيث تعتبر مجموعة مرتبة $(C_1, \leq_{C_1})$ بادئة لمجموعة مرتبة أخرى $(C_2, \leq_{C_2})$ إذا كان:

$$C_1 \subseteq C_2 \wedge \leq_{C_1} = \big(\leq_{C_2} \cap (C_2 \times C_1) \big) \qquad (٣.٣)$$

تشير علاقة البادئة إلى إمكانية متابعة التنفيذ من المجموعة الأولى للثانية، أي لإمكانية توسيع التنفيذ من مجموعة مرتبة P_1 لنحصل على مجموعة مرتبة ثانية P_2 إذا كانت P_1 بادئة لـ P_2.

يوضح الشكل التالي علاقة البادئة بين المجموعات المرتبة المذكورة في الفقرة السابقة، ممثلة على شكل أسهم (تم تجاهل الأسهم المتعدية والانعكاسية):



حيث يشير تعريف علاقة البادئة إلى أنه لا يمكن لأحداث جديدة (تنتمي للمجموعة المرتبة الثانية فقط) أن تكون سابقة لأحداث قديمة (تنتمي للمجموعة البادئة). وهذا بديهي، حيث إن متابعة التنفيذ عادة تضيف أحداثا قد تعتمد على الأحداث التي تم تنفيذها، وليس العكس. فمثلا لا يمكن للمثال التالي أن يمثل علاقة بادئة. [١]

$$\boxed{a} \longrightarrow \boxed{b \longrightarrow a}$$

أما عائلة المجموعات المرتبة فتعرف رياضيا على أنها مجموعة من المجموعات المرتبة مغلقة إلى الأسفل (Downwards) على عملية البادئة. أي من أجل كل مجموعة مرتبة من العائلة فإن بادئات تلك المجموعة موجودة في العائلة أيضا. وهذا ما ينتهي بالمجموعة المرتبة الخالية صاحبة الترتيب الخالي $(\emptyset, \emptyset)$ والتي تعتبر بادئة لأي مجموعة مرتبة. فالمجموعة الموضحة بالشكل السابق تشكل عائلة مجموعات مرتبة.

تعتبر عوائل المجموعات المرتبة نموذجا تزامنيا أكثر قدرة تعبيرية من عوائل التشكيلات [25]. فلا يمكن مثلا التعبير عن

[١] لا يمكن إيجاد مثال عن هذه الحالة من بنى الأحداث الرزمية لأنها لا تحتوي على أحداث مرتبة سوى الأحداث المرتبطة سببيا، وإنما سنرى هذه الحالة في بنى الأحداث الرزمية الموسعة في ٤.١.

التنافر القابل للحل من خلال عوائل التشكيلات كما سنرى في فصل لاحق، بينما يمكن التعبير عنه من خلال عوائل المجموعات المرتبة [25].

وعليه يمكن استخدام عوائل المجموعات المرتبة لإعطاء الدلالة لبنى الأحداث الرزمية ولجميع بنى الأحداث التي يمكن إعطاء دلالة لها من خلال بنى التشكيلات كالبنى المستقرة والأولية.

الباب ٤

التنافر اللاتناظري والتنافر القابل للحل
Asymmetric and Resolvable Conflict

٤.١ بنى الأحداث الرزمية الموسعة
Extended Bundle Event Structures

يمكن استبدال علاقة التنافر التناظرية بأخرى لا تناظرية كما في بنى الأحداث اللاتناظرية (Asymmetric Event Structures) في [6]

وكذلك في بنى الأحداث الرزمية الموسعة (Extended Bundle Event Structures) في [22].

حيث يمكن لوقوع حدث مثل e_1 أن يلغي وقوع (يقصي) حدثا آخر e_2 ولكن العكس ليس صحيحا بالضرورة، فوقوع الحدث e_2 لا يلغي بالضرورة وقوع الحدث e_1. ومع ذلك يمكن للحدثين الوقوع في تشكيل واحد $\{e_1, e_2\}$ ولكن عندها يجب على الحدث e_2 أن يسبق الحدث e_1 الذي لن يكون له تأثير عند وقوعه على حدث قد وقع بالفعل كالحدث e_2.

وأما بلغة الآثار فيمكن الحصول حينها من المثال هذا على الأثر e_1 وكذلك الأثر e_2 وكذلك e_2, e_1 ولكن لا يمكن الحصول على e_1, e_2.

تعتبر علاقة التنافر هذه (اللاتناظرية) أكثر تعبيرا من علاقة التنافر التناظرية، والتي يمكن نمذجتها من خلال التنافر اللاتناظري بالنسبة لحدثين متنافرين $a\#b$ بالقول أن a يقصي b وكذلك b يقصي a. [١]

سندرس في هذا الفصل علاقة التنافر اللاتناظري مضافة على بنى الأحداث الرزمية لتنتج ما يسمى ببنى الأحداث الرزمية الموسعة.

٤.١.١ التعريف الرياضي

يمكن تعريف بنى الأحداث الرزمية الموسعة كما ورد في [22] من خلال استبدال علاقة التنافر التناظرية في بنى الأحداث الرزمية بأخرى لا تناظرية.

---

[١] لا نقصد بالعلاقة اللاتناظرية Asymmetric هنا أنها ضد تناظرية Anti-Symmetric وإنما المقصود أنها ليست بالضرورة تناظرية.

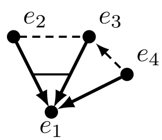
Definition 1.4.1. *An* Extended Bundle Event Structure (EBES) *is a triple* $\varepsilon = (E, \rightsquigarrow, \mapsto)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\rightsquigarrow \subseteq E^2$*, an irreflexive asymmetric relation (the* disabling *relation)*
- $\mapsto \subseteq \mathcal{P}(E) \times E$*, the* enabling *relation*

that additionally satisfies the stability *constraint:*

$$\forall X \subseteq E. \forall e \in E. X \mapsto e \implies \forall e_1, e_2 \in X \,.\, (e_1 \neq e_2 \implies e_1 \rightsquigarrow e_2)$$

حيث تشترط البنى الرزمية الموسعة شرط الاستقرار كما في البنى الرزمية والمستقرة وذلك من خلال الإقصاء المتبادل (الذي يعبر عن التنافر) بين أحداث الرزمة الواحدة.



ففي هذا الشكل نرى مثالا عن بنية أحداث رزمية موسعة، يقصي فيها الحدث e_3 الحدث e_4 حيث يتم التعبير عن الإقصاء رسوميا بسهم متقطع، وأما رياضيا فيكتب بالشكل $e_4 \rightsquigarrow e_3$ [٢]. إضافة، يتحقق شرط الاستقرار في هذه البنية بين e_2 و e_3 حيث

[٢]إن اتجاه أسهم الإقصاء رسوميا ورياضيا يتوافق مع الأسبقية القائلة أن الحدث e_4 سيسبق الحدث e_3 في أي تشكيل يجمعهما كما وضحنا سابقا، وكما سنرى في تعريف علاقة الأسبقية.

يقصي كل منهما الآخر، فقد تم التعبير عن هذا الإقصاء المتبادل بخط متقطع كالتنافر التناظري في البنية الرزمية.

أما الأثر في بنى الأحداث الرزمية فيعرف على أنه تسلسل من الأحداث خال من التنافر وفيه كل حدث مفعل بما يسبقه من أحداث. لتعريف ذلك رياضيا، نستعين بتعريف مجموعة الأحداث المفعلة بتسلسل ما، كما يلي:

Definition 1.4.2. *Let $\varepsilon = (E, \rightsquigarrow, \mapsto)$ be an EBES, and let $\sigma = e_1, \ldots, e_n$ be a sequence of events and $\bar{\sigma} = \{e_1, \ldots, e_n\}$ such that $\bar{\sigma} \subseteq E$. We use $\mathrm{en}_\varepsilon(\sigma)$ to refer to the set of events enabled by σ:*

$$\mathrm{en}_\varepsilon(\sigma) \;:=\; \big\{e \in (E \setminus \bar{\sigma}) \mid (\nexists e' \in \bar{\sigma} \,.\, e \rightsquigarrow e') \;\wedge \\ (\forall X \subseteq E \,.\, X \mapsto e \implies X \cap \bar{\sigma} \neq \emptyset)\big\}$$

Then the sequence $\sigma = e_1, \ldots, e_n$ is called a trace *of ε iff:*

$$\forall i \leq n \,.\, e_i \in \mathrm{en}_\varepsilon(\sigma_{i-1})$$

أما بالنسبة للتشكيلات، فيقال عن مجموعة من الأحداث أنها تشكيل في بنية رزمية موسعة إذا أمكن إيجاد أثر في نفس البنية مؤلف من أحداث تلك المجموعة. بتعبير آخر يمكن القول عن مجموعة من الأحداث على أنها تشكيل في بنية رزمية موسعة إذا أمكن كتابتها على شكل تسلسل من الأحداث يكون أثرا في تلك البنية. وهذا مطابق لتعريف التشكيلات في البنى الرزمية.

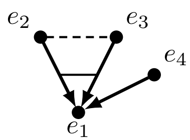
وكما في بنى الأحداث المستقلة والرزمية فإن تعريف التشكيل بالاعتماد على مفهوم الأثر يمكّن من تجنب المجموعات الحاوية على حلقات سببية.

نشير إلى مجموعة آثار بنية رزمية موسعة ε بالرمز $\mathrm{T}(\varepsilon)$ وإلى مجموعة تشكيلات تلك البنية بالرمز $\mathrm{C}(\varepsilon)$. فقد تم البرهان

في [22] أنه من أجل بنيتين $\varepsilon, \varepsilon'$ إذا تساوت آثارها فسوف تتساوى تشكيلاتها ولكن العكس غير صحيح. أي:

$$\mathrm{T}(\varepsilon) = \mathrm{T}(\varepsilon') \implies \mathrm{C}(\varepsilon) = \mathrm{C}(\varepsilon') \tag{٤.١}$$

كمثال، لنأخذ الشكل السابق حيث نلاحظ أنه يعطي نفس التشكيلات التي يعطيها الشكل التالي لو قمنا بإسقاط الإقصاء $e_3 \rightsquigarrow e_4$. ولكن الآثار سوف تختلف في البنيتين حيث إن التسلسل e_4, e_3 ليس بأثر في البنية الأولى ولكنه أثر في البنية التالية.



لذلك لا يمكن للتشكيلات وعوائلها أن تعبر عن دلالات البنى الرزمية الموسعة. وإنما هي بحاجة لنموذج للتنفيذات (Runs) أكثر تعبيرا من عوائل التشكيلات، كالمجموعات المرتبة وعوائلها. [٣]

فحتى نعرّف المجموعات المرتبة في بنى الأحداث الرزمية الموسعة علينا أولا تعريف علاقة الترتيب في التشكيلات، وهي على الشكل التالي.

Definition 1.4.3. *Let $\varepsilon = (E, \rightsquigarrow, \mapsto)$ be a BES and $C \in \mathrm{C}(\varepsilon)$, and $e, e' \in C$. Then $e \prec_C e'$ if $\exists X \subseteq E\,.\, \big(e \in X \wedge X \mapsto e'\big) \vee e \rightsquigarrow e'$. Let $\leq_C$ be the reflexive and transitive closure of $\prec_C$.*

---

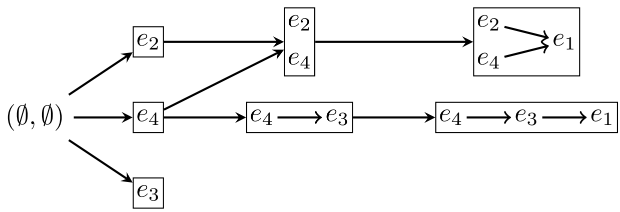
[٣] يمكن إعطاء الدلالة الرياضية للبنى الرزمية الموسعة من خلال الآثار، ولكن كما نوهنا فالآثار لا تعتبر نموذجا تزامنيا حقيقيا كونها لا تعبر عن الأحداث المتزامنة إلا من خلال اختلاف ترتيبها.

حيث تم البرهان في [22] على أن $\leq_C$ هي علاقة ترتيب جزئي على المجموعة C. حيث نلاحظ أن علاقة الأسبقية هنا تنجم ليس فقط عن السببية كما في البنى الرزمية وإنما أيضا عن علاقة الإقصاء، وهذا ما يجعل من المجموعات المرتبة وعوائلها أدوات مناسبة للتعبير عن دلالات البنى الرزمية الموسعة، وهو ما لا تستطيع التشكيلات وعوائلها فعله كما رأينا.

لقد تم البرهان أيضا في [22] على أنه إذا تساوت آثار بنيتين رزميتين موسعتين $\varepsilon, \varepsilon'$ فسوف تتساوى مجموعاتهما المرتبة والعكس صحيح.

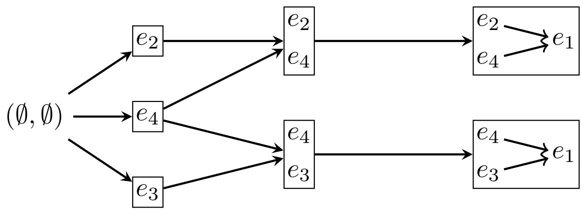
$$\mathrm{T}(\varepsilon) = \mathrm{T}(\varepsilon') \iff \mathrm{P}(\varepsilon) = \mathrm{P}(\varepsilon') \quad (٤.٢)$$

وبالاعتماد على تعريف عوائل المجموعات المرتبة المذكور سابقا يمكن اشتقاق عوائل المجموعات المرتبة للبنى الرزمية الموسعة. فمثلا تعتبر العائلة التالية عائلة أعظمية (تحوي جميع المجموعات المرتبة) للبنية الرزمية الموسعة المذكورة ببداية الفصل والحاوية على الإقصاء $e_3 \rightsquigarrow e_4$.



حيث نلاحظ أن المجموعة المرتبة المعرفة على $\{e_3\}$ ليست بادئة للمجموعة المرتبة الحاوية المعرفة على $\{e_4, e_3\}$ لأنه لا يمكن إضافة الحدث e_4 بشكل يسبق الحدث e_3 كما يحدد تعريف عائلة المجموعات المرتبة.

أما عائلة المجموعات المرتبة الأعظمية لنفس البنية بعد إسقاط الإقصاء $e_4 \leadsto e_3$ فهي كالتالي:



٤.١.٢ القوة التعبيرية

تعتبر بنى الأحداث الرزمية الموسعة أكثر قدرة تعبيرية من البنى الرزمية كونها قادرة على التعبير عن حالة التنافر اللاتناظري، فهي قادرة على نمذجة بنى الأحداث الرزمية وعلاقة التنافر التناظري فيها كما رأينا. وعليه يمكن الاستنتاج أيضا أن بنى الأحداث الرزمية الموسعة أكثر قدرة تعبيرية من بنى الأحداث الأولية التي بدورها أقل قدرة تعبيرية من البنى الرزمية.

وأما بالنسبة لبنى الأحداث المستقرة، فهنالك بعض البنى المستقرة التي لا يمكن إيجاد بنى أحداث رزمية موسعة (أو رزمية كما شهدنا) مقابلة لها بحيث تمتلك نفس التشكيلات، نتيجة قيد الاستقرار الفضفاض الذي تمتلكه البنى المستقرة مقارنة بقيد الاستقرار الصارم للبنى الرزمية والرزمية الموسعة.

وبالمقابل فلا يمكن لبنى الأحداث المستقرة نمذجة علاقة الإقصاء أو التنافر اللاتناظري. ومنه يمكن القول أن البنى المستقرة غير قابلة للمقارنة مع البنى الرزمية الموسعة [8]،

أي لا يمكن اعتبار إحداهما أكثر قدرة تعبيرية من الأخرى أو مساوية لها.

٤.٢ بنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل Event Sructures for Resolvable Conflict

تم في [30] تطوير بنى أحداث تسمح بقابلية حل التنافر بين الأحداث. حيث يمكن فيها أن يكون حدثان معينان على تنافر يمنعهما من الوقوع معا في تشكيل واحد، حتى يقع حدث ثالث، يمكنهما من الوقوع بنفس التشكيل بحيث يتم حل ذلك التنافر المتواجد بدايةً.

تتألف بنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل من مجموعات من الأحداث وعلاقة تفعيل تربط بين المجموعات وليس بين الأحداث المفردة، بحيث تنمذج هذه العلاقة ذاتها السببية والتنافر معا.

٤.٢.١ التعريف الرياضي

Definition 2.4.1. *An* Event Structure for Resolvable Conflict (RCES) *is a pair* $\rho = (E, \vdash)$*, where* E *is a set of* events *and* $\vdash \subseteq \mathcal{P}(E)^2$ *is the* enabling relation.

لنأخذ كمثال البنية $\rho = (E, \vdash)$، بحيث $E = \{a, b, c\}$ و $\{b\} \vdash \{a, c\}$ و $X \vdash \emptyset$ إذا وفقط إذا $X \subseteq E$ وبحيث $X \neq \{a, c\}$.

يمثل هذا المثال حالة التنافر المذكورة سابقا بين حدثين a, c القابلة للحل بحدوث b. حيث نرى في البنية أن المجموعة الخالية تفعل أي مجموعة من الأحداث مثل $\{a\}$، $\{b\}$، $\{c\}$ وكذلك $\{a, b\}$ و $\{c, b\}$ و $\{a, b, c\}$ فكل من هذه المجموعات مفعلة بداية (Initially). فهذا التفعيل البدائي يشير إلى أن يمكن بداية (ابتداء من التشكيل الخالي) وقوع الحدث a أو الحدث b أو c أو a, b معاً أو b, c معاً ولكن ليس a, c معا أو حتى a, b, c كما سنرى. فيشير هذا التفعيل البدائي إلى أن الحدثين a, c متنافران، إلا إذا وقع الحدث b، كما هو مشار إليه صراحة من خلال $\{a, c\} \vdash \{b\}$. ستكتمل هذه الصورة عن كيفية حل هذا التنافر بين a, c من خلال نموذج انتقال التشكيلات الذي يعطي هذه البنى دلالتها الرياضية. (٤)

٤.٢.٢ نموذج انتقال التشكيلات Configuration Transition

تم إعطاء الدلالة الرياضية لبنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل من خلال نموذج الانتقال بين التشكيلات، كما هو معرف فيما يلي.

Definition 2.4.2. *Let $\rho = (E, \vdash)$ be an RCES and $X, Y \subseteq E$. Then $X \rightarrow_{\mathrm{rc}} Y$ iff $(X \subseteq Y \wedge \forall Z \subseteq Y \,.\, \exists W \subseteq X \,.\, W \vdash Z)$. The set of* configurations *of ρ is defined as:*

$$\mathrm{C}(\rho) = \{X \subseteq E \mid \emptyset \rightarrow^*_{\mathrm{rc}} X \wedge \ X \text{ is finite}\}$$

where $\rightarrow^*_{\mathrm{rc}}$ is the reflexive and transitive closure of $\rightarrow_{\mathrm{rc}}$.

(٤) بما أنه تم تطوير هذه البنى لتكون تعميما لبنى الأحداث المستقرة، فلعلاقة التفعيل في هذه البنى نفس الرمز $\vdash$ المستخدم في بنى الأحداث المستقرة.

حيث يشير هذا التعريف إلى أنه يمكن الانتقال بين مجموعتين من الأحداث X, Y إذا كانت إحداهما محتواة في الأخرى $X \subseteq Y$ وكان لكل مجموعة جزئية من Y مجموعة مفعلة لها في X. وبالعودة إلى مثالنا السابق عن التنافر بين a, c القابِل للحل بوقع b يمكننا رسم نموذج انتقال التشكيلات لتلك البنية كما يلي.

$$\begin{tikzcd}
 & \{a\} \arrow[r] & \{a,b\} \arrow[dr] & \\
\emptyset \arrow[ur] \arrow[r] \arrow[dr] \arrow[urr] \arrow[drr] & \{b\} \arrow[ur] \arrow[dr] \arrow[rr] & & \{a,b,c\} \\
 & \{c\} \arrow[r] & \{b,c\} \arrow[ur] &
\end{tikzcd}$$

فهذا يبين أنه لا يمكن الانتقال إلى $\{a, b, c\}$ إلا عبر المرور بالحدث b. حيث يمكن الملاحظة أيضا أنه لا يمكن الانتقال من الخالية إلى $\{a, b, c\}$ لأن $\{a, c\} \subset \{a, b, c\}$ و $\emptyset \not\vdash \{a, c\}$.

لا يمكن إعطاء دلالة رياضية لبنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل من خلال عوائل التشكيلات، والتي تشير صراحة في الشرط الثاني من تعريفها إلى أنه إذا ثمت ثلاث تشكيلات X, Y, Z في عائلة ما، بحيث $X \cup Y \subseteq Z$ فيتوجب أن يكون $X \cup Y$ تشكيلا من العائلة. وهذا لا ينطبق في مثالنا السابق، فاجتماع المجموعة $\{a\}$ والمجموعة $\{c\}$ محتوى في المجموعة $\{a, b, c\}$ ولكن لا يمكن للمجموعة $\{a, c\}$ أن تكون تشكيلا في البنية. (٥)

(٥) لا يتوفر لدينا دراسة تتناول القدرة التعبيرية لنموذج انتقال الحالات مقارنة بالنماذج الأخرى كعوائل التشكيلات وعوائل المجموعات المرتبة. فلا يمكن الجزم بأنن نموذج انتقال الحالات أكثر قدرة تعبيرية من عوائل التشكيلات بناء على المثال السابق.

٤.٢.٣ القوة التعبيرية

إن بنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل أكثر قدرة تعبيرية من البنى الأولية والمستقرة الغير قادرة بدورها على نمذجة التنافر القابل للحل، كما هو مبرهن في [30]. إضافة فقد تم في نفس المرجع الإشارة إلى كيفية نمذجة بنى الأحداث الرزمية الموسعة من خلال البنى ذات التنافر القابل للحل. إضافة فقد تم في [1] تعريف لاشتقاق بنية ذات تنافر قابلة للحل من أي بنية أحداث ممثلة من خلال نموذج انتقال الحالات، بحيث أن البنية المشتقة مكافئة للبينة الأصلية من حيث التشكيلات وانتقالاتها. ويعتبر هذا برهانا أن بنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل أكثر قدرة تعبيرية من أي نوع من البنى يمكن تمثيله من خلال نموذج انتقال التشكيلات.

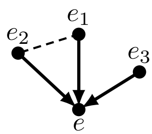
الباب ٥

القفل الميت في بنى الأحداث التدفقية
Deadlock in Flow Event Structures

٥.١ بنى الأحداث التدفقية
Flow Event Structures

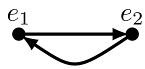
توسع بنى الأحداث التدفقية كما تم تعريفها في [7] القدرات التعبيرية لبنى الأحداث الأولية، وتسقط بعض الشروط المتواجدة فيها. تسمح عموما بنى الأحداث التدفقية بالتنافر بين مُسببِات حدث ما. فعندها لا يكون مثل ذلك الحدث مستحيلا، بل يُشترط

حدوث كل المسببات غير المتنافرة لتمكين ذلك الحدث.
فيمكن في المثال التالي تمكين الحدث e من خلال $\{e_1, e_3\}$ أو $\{e_2, e_3\}$. فهي بذلك تفتح الباب أمام تعدد الخيارات في تفعيل الأحداث، على غرار بنى الأحداث المستقرة والرزمية.

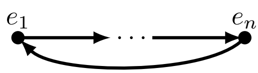


٥.١.١ الحلقات السببية Causal Cycles

تسمح بنى الأحداث التدفقية بنمذجة أكثر واقعية للنظم المدروسة والتي لا تخلو أحيانا من الحلقات الاعتمادية. فبنى الأحداث التدفقية تسمح بالتالي مثلاً:



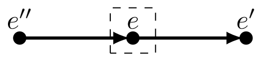
ويعتبر كل من e_1 و e_2 عندها حدثا مستحيلا يعبر عن حالة قفل ميت (Dead Lock). ويمكن تعميم المثال السابق على أكثر من حدثين.



٥.١.٢ الأحداث اللامتسقة Inconsistent Events

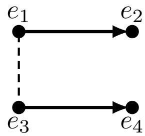
تسمح بنى الأحداث التدفقية بوجود أحداث متنافرة مع ذاتها. فهي لا تشترط أن تكون علاقة التنافر غير انعكاسية (Irreflexive). فيمكن القول إن $e\#e$، ويتم تمثيله رسوميا بمربع يحيط بالحدث e. فالحدث e هنا يمثل حدثاِ غير متسق (مع ذاته) ولا يمكنه الحدوث، لأن التشكيلات يُشترط أن تكون خالية من التنافر. فإذا ثمت حدث آخر مثل e' يعتمد على e فسيكون e' حدثا مستحيلا أيضا، كما يوضح المثال التالي.

إن حالة القفل الميت هي حالة لا يمكن لمعالجة ما عندها متابعة التنفيذ كما سنرى في التشكيلات التامة. أي لا يمكن عندها توسيع التشكيل (المعبر عن تلك الحالة) بتنفيذ بعض الأحداث الأخرى. وإذا كان لدينا المثال التالي سنرى أنه بعد التشكيلِ $\{e''\}$ لا يمكن تنفيذ المزيد من الأحداث وستكون المعالجة الممثلة في حالة قفل ميت.

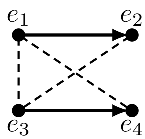


٥.١.٣ إسقاط وراثة التنافر

تسقط بنى الأحداث التدفقية أيضا شرط وراثة التنافر (Conflict Heridity) الخاص ببنى الأحداث الأولية. فتعتبر البنية في المثال التالي بنية تدفقية.



ولو كنا نستخدم بنية أحداث أولية سيكون المثال ذاته على الشكل التالي:



ولكن بالعودة للبنية التدفقية السابقة فإنه بعد التشكيل $\{e_1, e_2\}$ لا يمكن تنفيذ أي حدث آخر لأن الأحداث الباقية متنافرة ضمنا وليس صراحة. يسمى هذا التنافر الضمني بالتنافر الدلالي (Semantic) أما التنافر الظاهر فيسمى بالنصي (Syntactic).

بالمقابل لا تمنع بنى الأحداث التدفقية وراثة التنافر الموجود في البنية الأولية في المثال السابق والتي يمكن اعتبارها أيضا بنية تدفقية. عندها تدعى تلك البنية التي يتطابق فيها التنافر النصي مع الدلالي بالبنية الصادقة (Faithful) لأنها تعكس تنافر الأحداث بصدق.

٥.١.٤ التعريف الرياضي للبنية التدفقية

Definition 1.5.1. *A* Flow Event Structure (Flow ES) *is a triple* $\delta = (E, \#, \prec)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\# \subseteq E^2$*, a symmetric relation (the* conflict *relation)*
- $\prec \subseteq E^2$ *an irreflexive relation (the* flow *relation)*

ويعرف التشكيل في البنى التدفقية، كما هو مقتبس من [8] على أنه مجموعة منتهية من الأحداث $X \subseteq E$ يحقق ما يلي:

- $X^2 \cap \# = \emptyset$
- $\forall e \in X \,.\, \forall e' \in E \,.\, e' \prec e \implies (e' \in X \vee \exists e'' \in X \,.\, e' \# e'' \prec e)$
- $\nexists e_1, \ldots, e_n \in X \,.\, e_1 \prec \ldots \prec e_n \prec e_1$, i.e. the transitive and reflexive closure $\leq_X$ of $\prec$ on X is a partial order
- $\forall e \in X \,.\, \{e' \mid e' \leq_X e\}$ is finite

حيث ينص الشرط الأول على الخلو من التنافر، أما الثاني فينص على أنه من أجل كل حدث في التشكيل يجب تواجد مسببات ذلك الحدث في التشكيل نفسه، إلا إذا وجد في ذلك التشكيل مسببات أخرى لنفس الحدث تتنافر معها. وأما الشرط الثالث فينص على عدم وجود حلقات سببية في التشكيل. وبناء عليه يمكن النظر إلى علاقة السببية في التشكيل (أي إسقاطها على التشكيل) على أنها علاقة ترتيب، مع أخذ التعدي والانعكاسية بعين الاعتبار. وأما الشرط الأخير فينص على أنه يجب أن تكون مسببات كل حدث في التشكيل مجموعة منتهية.

٥.١.٥ التشكيلات التامة والقفل الميت
Complete Configurations and Deadlock

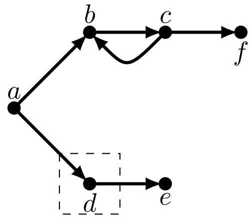
ليكن لدينا التشكيل X من البنية التدفقية $\delta = (E, \#, \prec)$. نقول عن هذا التشكيل أنه تام (Complete) إذا كان:

$$\forall d \in E \,.\, d \notin X \implies \exists e \in X \,.\, e \# d$$

وبالمقابل نقول عن X أنه أعظمي (Maximal) إذا كان:

$$\forall Y \in \mathrm{C}(\delta) \,.\, X \subseteq Y \implies X = Y$$

وعلى عكس بنى الأحداث الأولية، فليس كل تشكيل أعظمي تشكيلا تاما في البنى التدفقية، نتيجة الحلقات السببية والأحداث غير المتسقة، والاختلاف بين التنافر النصي والدلالي. فمثلا لنأخذ تشكيلات البنية التالية. فنلاحظ أن التشكيل $\{a\}$ أعظمي، ولكنه ليس بتشكيل تام.

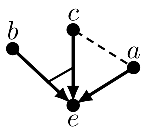


فإذا فرضنا أن الأحداث e, f تنتمي أصلا لمعالجة أخرى تم تركيبها مع المعالجة الحاوية على a, b, c, d بشكل تسلسلي (Sequential Composition) (كما سنرى في صقل الأحداث) عندها

ستكون تلك المعالجة غير قادرة على متابعة التنفيذ، أي في حالة قفل ميت [28].

Definition 1.5.2. *A flow event structure δ is deadlock-free iff every maximal configuration in δ is complete.*

٥.١.٦ القدرة التعبيرية لبنى الأحداث التدفقية

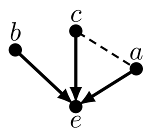


إن البنى التدفقية أقل تعبيرا من البنى المستقرة (من ناحية عوائل التشكيلات). فمثلا إذا أخذنا البنية المستقرة أعلاه نلاحظ أنه يمكننا الحصول على التشكيل $\{a, d\}$ وهذا غير ممكن في التدفقية لأننا إذا رغبنا بالحصول على بنية تدفقية بنفس الأحداث ونفس السببية والتنافر سنحصل على البنية التالية، وعندها لا يمكننا الحصول على التشكيلات $\{a, d\}$ أو $\{a, b, d\}$ لأن a غير متنافر مع b وعليه فإن b يجب حدوثه وحدوث a ليتم تمكين d حسب تعريف تشكيلات البنية التدفقية. أما إذا لم نحافظ على التنافر الموجود في البنية المستقرة من ذلك المثال، فلن نحصل على تشكيلات أخرى كانت موجودة في البنية الأصلية أو العكس.

إن سبب الاختلاف في القدرة التعبيرية بين البنى المستقرة والتدفقية نابع من أن الخيارات في التفعيل ترتبط في البنية التدفقية بشكل وثيق مع التنافر، فوجود تنافر بين المسببات يعني

أن بعضها اختياري. أما البنى المستقرة فتعرف الخيارات بشكل مستقل من خلال المجموعات المفعِلة (وكذلك الرزمية من خلال الرزم). ولذلك عند تحويل بنيَة مستقرة سنضطر لإضافة أو حذف بعض التنافرات للحصول على نفس الخيارات السببية، والذي سيؤثر بدوره على بعض التشكيلات.

على صعيد آخر فالبنى التدفقية أكثر تعبيرا من البنى الرزمية، فالبنية التدفقية التالية لا يمكن تمثيلها ببنية رزمية تعطي نفس التشكيلات. فالبنى الرزمية تفرض قيودا تنافرية بين أعضاء الرزمة الواحدة، وهو ما يختلف عن التنافر بين المسببات لحدث ما في البنى التدفقية حيث ترتبط تلك المسببات بعلاقة AND المنطقية $\wedge$.



٥.٢ مثال تطبيقي - نمذجة بنية الاستبعاد المتبادل Mutex

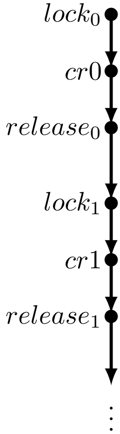
يتم عند برمجة النظم المتزامنة استخدام آليات تسمح بالتنسيق بين عمل المعالجات. فمثلا يتم استخدام بنية الاستبعاد المتبادل (Mutex) لتنسيق تنفيذ مجموعة من التعليمات تدعى بالمنطقة الحرجة (Critical Region). حيث عندما تقوم معالجة معينة بتنفيذ تعليمات المنطقة الحرجة الخاصة بها والتي تحتوي عادة على تعديل قيم بعض المتحولات (Variables) المشتركة أو الولوج

لمصادر مشتركة (Shared Resources) لا ترغب تلك المعالجة بأن تقوم معالجة أخرى بالولوج لنفس المصادر أو تعديل قيم المتحولات نفسها بنفس الوقت.

P	P'

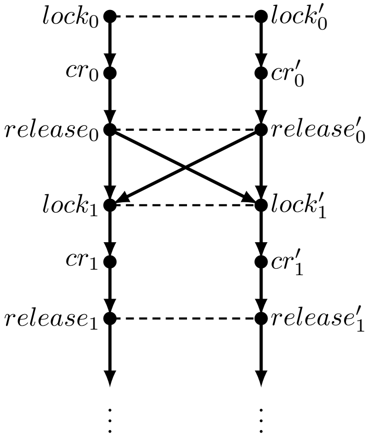
while true
{
lock
critical_region
release
}
	while true
	{
	lock
	critical_region
	release
	}

تقوم بنية الاستبعاد المتبادل عندها بمنح الولوج لتلك المصادر لواحدة من المعالجات فقط، والسماح للثانية بالولوج بوقت لاحق. فكيف يمكن إعطاء دلالة رياضية لعمل تلك البنية؟ في الواقع، يمكن ذلك من خلال تمثيلها ببنية أحداث تدفقية. حيث نمثل الحلقة بسلسة لا نهائية من الأحداث كما يلي.



يمثل الحدث $lock_0$ الحدوث الأول لعملية قفل بنية الاستبعاد المتبادل، ويمثل الحدث cr_0 الحدوث الأول لتعليمات المنطقة الحرجة، إلخ. ولتمييز أحداث المعالجة الأولى من أحداث الثانية نمثل الحدث الأول لعملية القفل في المعالجة الأولى بالحدث $lock_0$ ، بينما نمثل حدث القفل في المعالجة الثانية بالحدث $lock'_0$، وهكذا بالنسبة لباقي الأحداث.

عندها تكون بنية الأحداث التدفقية الحاوية على أحداث المعالجتين معا والتي تمثل منطق عمل بنية الاستبعاد المتبادل كالتالي.



نلاحظ أن الأحداث $lock_0$ و $lock'_0$ متنافرة ولا يمكن تنفيذ إلا أحدها. وينطبق هذا أيضا على أحداث فك القفل. بالمقابل نرى أن استحواذ إحدى المعالجات على القفل (كما في $lock_1$) ممكن بعد فك القفل من قبل نفس المعالجة $release_0$ أو من قبل المعالجة الأخرى $release'_0$، فالتنافر بين المسببات يتيح هذا الخيار.

إن الحدثين $release_0$ و $release'_0$ على تنافر ضمني لأن مسبباتهما متنافرة أصلا. ولكن من الضروري جعل هذا التنافر نصي كي نوفر الخيارية في تفعيل حدث القفل $lock_1$ وهذا ضروري كما رأينا. بينما ليس من الضروري أن يكون التنافر نصيا بين الحدثين cr_0 و cr'_0 المتنافرين ضمنا (دلالياًّ). وعليه لا يمكن اعتبار هذه البنية صادقة.

فإذا فرضنا وقوع $lock'_0$ عندها لا يمكن وقوع الأحداث $lock_0, cr_0, release_0$. ولكن هذا لا ينفي أن المعالجة P يمكنها

الحصول على القفل من خلال حدث قفل آخر، مثل $lock_1$. فالأحداث كما ذكرنا هي نسخ من الأفعال المتكررة كالقفل. بالمقابل فعند وقوع الحدث $release'_0$ فليس من الضروري وقوع الحدث $lock_1$، حيث يمكن إعطاء الدور للمعالجة P' مجدداً. وهذا نتيجة مبدأ عدم التحديد (Non-determinism) الذي ينص على عدم القدرة على تحديد أي من الحدثين سيقع عندما يكون هذان الحدثان على تنافر ومفعلين بنفس المسببات، مثل $lock_1, lock'_1$.

فالتعداد $lock_0, lock_1, \ldots$ هنا لا يمثل تكرار حلقة While بل هو نسخة من الأفعال. على سبيل المثال يمثل التشكيل $\{lock_0, cr_0, release_0, lock'_1, cr'_1, release'_1\}$ تكرارا واحدا لكل من المعالجتين.

أخيرا، يمكن تمثيل البنية السابقة ببنية مستقرة كون البنى المستقرة أكثر تعبيرا من التدفقية كما رأينا. وفي الواقع يمكن النظر للبنية السابقة على أنها بنية مستقرة أيضا (دون تغيير رسومي)، فهي تستوفي شروط الاستقرار والاتساقية وغيرها. ويمكن أيضا استخدام بنية أحداث رزمية أو رزمية موسعة، لكن لا يمكن استخدام بنية أحداث أولية.

وفي الختام، كيف ستبدو هذه البنية من أجل ثلاث معالجات؟

الباب ٦

التزامن اللاتناظري

Asymmetric Concurrency

٦.١ مقدمة

سنتعرف في هذا الفصل إلى حالة غير شائعة من التزامن تدعى التزامن اللاتناظري، يمكن فيها لحدثين a و b الحدوث بنفس الوقت، وكذلك أن يحدث a قبل b، ولكن لا يمكن حدوث b قبل a. وهذا ما يخالف تعريف التزامن الذي يرتبط باستقلالية الأحداث والقائل أن الحدثين المتزامنين يمكنهما الحدوث بنفس الوقت أو بأي ترتيب كان.

يمكن رؤية مثال عن هذه الحالة من التزامن اللاتناظري في

شبكات بتري ذات الأفعال المثبطة (Petri Nets with Inhebitor Archs) كما في [5]، وسنرى في هذا الباب مثالا عن بنية أحداث مقتبسة من [1] تحتوي على هذه الحالة من التزامن.

٦.٢ السببية الشرطية كمثال Conditional Causality

تنص السببية الشرطية والواردة في [1] على أنه يمكن لحدث b أن يصبح معتمداً على حدث a عند وقوع حدث آخر c، وهذه اعتمادية مشروطة بوقوع الحدث c.

Definition 2.6.1. *A* Conditional-Causality Event Structure *is a tripple* $\chi = (E, \#, \twoheadrightarrow)$ *where:*

- E*, a set of* events
- $\# \subseteq E^2$*, an irreflexive symmetric relation (the* conflict *relation)*
- $\twoheadrightarrow \subseteq \mathcal{P}(E)_1 \times E^2$*, the* enabling relation

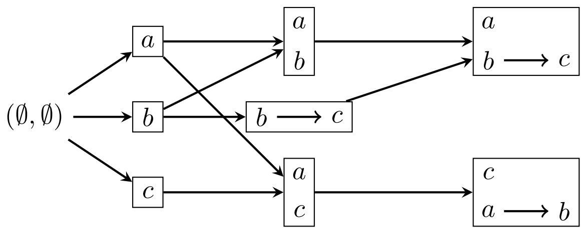
that satisfies the following constraint:

$$\forall e, e', e'' \in E \,.\, e'' \xrightarrow{\{e\}}\!\!\!\!\twoheadrightarrow e' \implies e'' \not\twoheadrightarrow e'$$

تربط علاقة التفعيل هنا بين مجموعة أحادية العنصر من جهة (وقد تكون خالية) وزوج من الأحداث من جهة أخرى. فمثلا $e'' \xrightarrow{\{e\}}\!\!\!\!\twoheadrightarrow e'$ هو ارتباط بين المجموعة $\{e\}$ والزوج (e'', e')، ما يعني أن e' يعتمد على e'' في حال وقوع e. وأما $e'' \longrightarrow\!\!\!\!\twoheadrightarrow e'$ فيعني أن e' يعتمد على e'' بداية، أي بشكل غير مشروط بوقوع أي حدث.

لنأخذ على سبيل المثال بنية الأحداث الشرطية $(E, \#, \twoheadrightarrow)$ بحيث $E = \{ab, c\}$ و $\# = \emptyset$ و $a \overset{\{c\}}{\twoheadrightarrow} b$. لنحاول أن نقوم باشتقاق الآثار لهذه البنية بناء على مفهوم السببية الشرطية (دون تعريف رياضي مبدئياً). سنستنتج بالنسبة للمثال الحالي أن التسلسل cba لن يكون أثرا في تلك البنية، وكذلك cb لأنه بمجرد وقوع c سيكون وقوع a ضروريا لوقوع b. أما التسلسلات التالية فستشكل آثارا في تلك البنية c، b، a، ba، ab، bc، ac، ca، bca، bac، cab، acb، abc.[١]

إن اشتقاق الآثار سهل في هذه الحالة، ولكن تفضل بنى الأحداث كنموذج حقيقي للتزامن الدلالات التي تظهر إمكانية تنفيذ الأحداث بالوقت ذاته وليس فقط من خلال اختلاف ترتيبها. لنحاول إعطاء مثل تلك الدلالة من خلال استخدام المجموعات المرتبة جزئيا والتي أثبتت كما رأينا قدرتها على التعبير عن حقيقة التنفيذ المتزامن. يمكننا التفكير في عائلة المجموعات المرتبة التالية كتنفيذات للبنية السابقة.



نلاحظ أنه لا يمكننا الحصول على المجموعة المرتبة الحاوية على b و c مستقلين، لأن هذا يعني إمكانية الحصول على الأثر cb

[١] تم إسقاط الفاصلة بين أحداث الآثار هنا لسهولة القراءة فقط.

غير الممكن. وبالمثل فلا يمكننا الحصول على المجموعة المرتبة الحاوية على a و b و c مستقلين عن بعضهم البعض، لأن ذلك يعني الحصول على الأثر cba غير الممكن.

في الواقع إن الحدثين b و c غير معتمدين على بعضهما مباشرة، وإنما تأتي اعتماديتهما من الحدث الثالث a الذي يصبح ضروريا لتنفيذ b عند وقوع c. باختصار، تنص السببية الشرطية على أنه فقط في حال وقوع c قبل b يصبح a ضروريا لوقوع b، فلا مانع من وقوع c و b بنفس الوقت.

بما أن هذا النوع من التزامن لا يترافق مع الاستقلالية الأحداث، فلا يمكن استخدام المجموعات المرتبة وعوائلها لإعطاء دلالة لهذا النوع من التزامن. فالمجموعات المرتبة تعبر عن التزامن من خلال استقلالية الأحداث حصرا. وبما أن عوائل المجموعات المرتبة جزئيا أكثر قدرة تعبيرية من عوائل التشكيلات، فلا يمكن أيضا إعطاء دلالة رياضية للتزامن اللاتناظري من خلال عوائل التشكيلات. [٢]

[٢]يمكن تجنب حالة التزامن اللاتناظري من خلال منع الحدثين c و b من الحدوث بآن واحد، عندها يمكن استخدام المجموعات المرتبة وعوائلها لإعطائها الدلالة الرياضية. وهذا من تتبعه العديد من بنى الأحداث. فمثلا إذا فرضنا حدثا يقوم بإقصاء حدث آخر في البنى الرزمية الموسعة، فلا يمكن وقوع هذين الحدثين بذات الوقت كما توضح المجموعات المرتبة الخاصة بتلك البنى. ولكن في حال تمكين هذين الحدثين من الحدوث بالوقت ذاته، سنحتاج لنماذج أخرى لإعطاء دلالة رياضية لتلك الحالة، وهذا ما سنراه في الفصلين القادمين.

٦.٣ الدلالة من خلال بنى الترتيب المتراصفة Stratified Order Structures

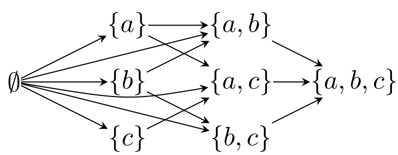
تم في [18] تعريف بنى الترتيب المتراصفة والتي تعتبر توسيعا لمفهوم المجموعات المرتبة. فإضافة لعلاقة الأسبقية التي تعرفها المجموعات المرتبة، تعرف بنى الترتيب المتراصفة علاقة إضافية تسمى علاقة (ليس بعد). حيث تكتب تلك البنية على شكل ثلاثية $(X, \prec, \sqsubset)$ تتألف من مجموعة X وعلاقة الأسبقية $\prec$ وعلاقة (ليس بعد) $\sqsubset$. فالقول أن $b \sqsubset c$ يعني أن b لا يقع بعد c، فإما بذات الوقت أو يسبقه.

إن علاقة $\sqsubset$ هي علاقة تناظرية، فكل حدث يقع مع ذاته بنفس الوقت، وهي متعدية أيضا. وبتعبير آخر يمكن الاستنتاج أنها علاقة ما قبل الترتيب (Preorder).

يمكن استخدام هذ البنى لإعطاء الادلالة الرياضية للتزامن اللاتناظري من خلال علاقة $\sqsubset$. فمثلا يمكن كتابة التشكيل $\{b, c\}$ من مثالنا عن السببية الشرطية على شكل البنية المتراصفة $(X, \prec, \sqsubset)$ حيث $X = \{b, c\}$ و $\prec = \emptyset$ و $b \sqsubset c$. وبالمثل يمكن اشتقاق البنى المتراصفة لبقية التشكيلات في ذلك المثال، مع الملاحظة أنه إذا ثمت حدث e_1 يسبق يسبق حدثا e_2 فإن e_1 لن يقع قبل e_2 وضوحا، أي بتعبير رياضي: $e_1 \prec e_2 \implies e_1 \sqsubset e_2$.

٦.٤ الدلالة من خلال نموذج انتقال التشكيلات Configuration Transition

يمكن استخدام نموذج انتقال التشكيلات، والمستخدم أيضا في بنى الاحداث ذات التنافر القابل للحل، للتعبير عن التزامن اللاتناظري كما هو موضح في [1]. يوضح الشكل التالي مثلا مخطط انتقال التشكيلات لمثال السببية الشرطية المذكور سابقا.



يري المخطط بوضوح أنه لا يمكن الانتقال من $\{c\}$ إلى $\{b,c\}$. بينما يمكن الانتقال من $\emptyset$ إلى $\{b,c\}$ والذي يعني إمكانية تنفيذ b و c بنفس الوقت.

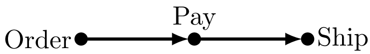
الباب ٧

صقل الأفعال في بنى الأحداث

Action Refinement in Event Structures

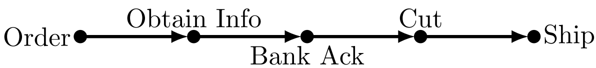
٧.١ مفهوم صقل الأفعال

إن مسألة النظر إلى بعض الأفعال وتمثيلها على شكل ذري (Atomic) أي كحدث غير قابل للتجزي ء هو مسألة تجريد. فكثيرا ما نرغب بإعادة تمثيل بعض الأحداث الممثلة ذريا على أنها تسلسل مجموعة من الأحداث لتوضيح الخطوات الداخلية.



فقد نقوم مثلا بمستوى مجرد بتمثيل مخطط شراء منتج ما على أنه مؤلف من عملية الطلب ثم الدفع ثم الشحن. وأما على المستوى التفصيلي فقد نقول أن الدفع يتألف من عملية إدخال بيانات الدفع ثم الحصول على موافقة المصرف، ثم اقتطاع المبلغ كما يلي.

فكيف يمكن تصور بنية الأحداث الكلية الممثلة لعميلة شراء المنتج وشحنه أخذين بعين الاعتبار التفاصيل الداخلية لعملية الدفع؟ في واقع الأمر، ستكون معرفة على الشكل الموضح أدناه. فنحن نعلم أن عملية الشراء ضرورية لعملية الدفع وبالتالي ضرورية للوصول لخطوة من خطوات الدفع وهي عملية إدخال بيانات الدفع. وكذلك إن عملية الشحن لن تتم قبل اكتمال الدفع، أي قبل انتهاء آخر خطواته التي هي اقتطاع المال.

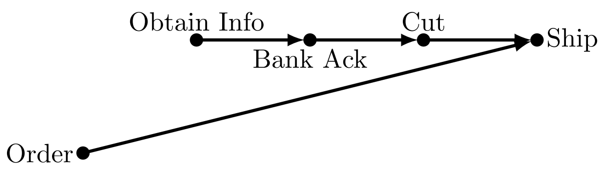


تسمى عملية استبدال الأفعال (أو الأحداث) بمجموعة أخرى من الأفعال (أو الأحداث) بعملية صقل الأفعال (Action Refinement) وهي عملية معرفة على العديد من نماذج نظرية التزامن مثل جبر المعالجات، الأشجار السببية (Causal Trees) وغيرها كما

نرى في [29, 26, 27, 28, 14, 13]، والتي تنقل الأفعال (والأحداث) من حالتها الذرية غير المجزأة إلى حالتها المجزأة.

حيث تعرف هذه العملية آلية الانتقال من بنية أحداث معرفة على مستوى تجريدي عال إلى بنية أحداث على مستوى أكثر تفصيلا (أو أقل تجريدا)، من خلال استبدال كل حدث بخطواته الداخلية. أما عملية الانتقال بالأحداث من المستوى التفصيلي إلى المستوى التجريدي فتسمى بعملية التجريد (Abstraction) كما هو موضح في [11]، ولكننا سنركز اهتمامنا في هذا الفصل على عملية الصقل، ونترك للقارئ مهمة التبحر في عملية التجريد.

الصقل هو ما يحدث في الواقع عند تصميم البرمجيات، حيث يبدأ التصميم (Design) بمخططات مجردة تعكس البنى والخطوات الرئيسية، ومن ثم يتم الانتقال إلى مرحلة التحقيق (Implementation) حيث يتم الحفاظ على الخطوات الرئيسية ولكن بتفصيل أكبر، دون تغيير التسلسل المذكور في التصميم. فمن غير المسموح في التحقيق إضافة ما لم يكن مسموحا في التصميم، أو منع ما كان مسموحا. فالبنية الموضحة بالشكل التالي لا تعتبر صقلا لعملية الشراء، لأنها تسمح بالتنفيذ المتزامن لحدث الطلب مع أحداث عملية الدفع، ولكن الطلب يجب أن يسبق الدفع كما هو في البنية الأصلية.



من جهة أخرى يمكن أن تفيد دراسة صقل الأحداث ليس فقط باشتقاق البنية الأكثر تفصيلا، وإنما بالحكم بأن تكون بنية

أحداث تفصيلية معينة ناجمة عن صقل بنية أخرى أم لا، أو بتعبير آخر بأن البنيتين مرتبطتان مع بعضهما بعلاقة صقل أم لا كما سنرى. فلنطرق أبواب صقل الأحداث من خلال التعرف على بعض المفاهيم الأساسية في الفقرات التالية.

٧.١.١ وراثة السببية

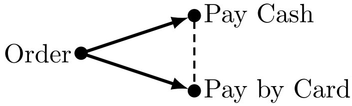
بالعودة إلى مثال الشراء، نجد أننا قمنا عند تعريف بنية الأحداث التفصيلية لها باحترام السببية الموجودة في البنية الأصلية، فقد جعلنا أولى خطوات الدفع تعتمد سببيا على عملية الشراء لأن عملية الدفع بالبنية الأصلية تعتمد على عملية الشراء. وكذلك الأمر بالنسبة لعملية الشحن واعتمادها على عملية الدفع وخطواتها التفصيلية.

يسمى هذا المفهوم بعملية وراثة السببية من بنية الأحداث الأصلية للبنية التفصيلية. وهو مفهوم ضروري لنحصل على التطابق في التشكيلات بين البنيتين. فإذا وجد حدث e يعتمد على حدث e' في البنية الأصلية فإن جميع أحداث e في البنية التفصيلية يجب أن تعتمد على جميع أحداث e'. وأما في مثالنا السابق فتم الاعتماد على الحدث الأخير في الشراء، وهذا كافٌ نتيجة التسلسل المفروض بين أحداث عملية الدفع.

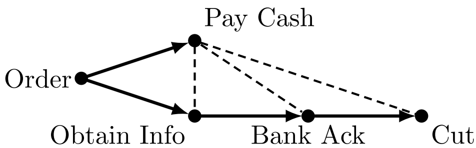
٧.١.٢ وراثة التنافر

بالمقابل فإذا وجد في البنية الاصلية حدثان على تنافر فلا يمكن إلا تكون أحداثهما الجزئية على تنافر في البنية التفصيلية.

فإذا فرضنا أن عملية الدفع تتم إما لاحقا بشكل نقدي أو مسبقا بشكل مصرفي. وأن عملية الدفع بالبطاقة يمكن صقلها كما في المثال السابق من خلال إدخال معلومات البطاقة والحصول على موافقة البنك ثم اقتطاع المبلغ.



فعلى المستوى التفصيلي بعد صقل حدث الدفع بالبطاقة (أو حتى حدثي الدفع)، لا يمكن البدء بالأحداث الجزئية لكليهما. فإما أن نشرع بتنفيذ (أحداث) الدفع نقدا أو أحداث الدفع مصرفيا. [١]



٧.١.٣ عدم استخدام بنى خالية في الصقل

يمكن، نظريا، تعريف بنى أحداث خالية، أما في صقل الأفعال والأحداث فإن البنى المطروحة هي لاستبدال أحداث معينة موجودة

[١] لا يقصد بوراثة التنافر هنا الوراثة المشار إليها في بنى الأحداث الأولية، وإنما احترام التنافر الوارد في البنى الأصلية.

فعلا، فمن غير الممكن استبدال تلك الأحداث ببنى خالية، فهذا يعد تفريغا للأحداث وحذفا لها. فعلى الأقل يتم ترك الحدث دون صقل ليظهر ذلك الحدث كما هو في البنية التفصيلية.

إضافة فإن استبدال الأحداث ببنى خالية قد يسمح بحدوث تنفيذات لم تكن مسموحة في البنية المجردة. فمثلا إذا ثمت حدث مستحيل الحدوث e يعتمد عليه حدث آخر e'، بحيث ليس للحدث e' أي مفعلات أخرى. وقمنا باستبدال الحدث المستحيل e ببنية خالية بينما أبقينا على الحدث e' كما هو في البنية التفصيلية. عندها لن يصبح الحدث e' مستحيلا في البنية التفصيلية، وهو ما كان عليه في البنية المجردة نتيجة اعتماده على حدث مستحيل.

٧.٢ الصقل في بنى الأحداث الأولية

لنأخذ بنى الأحداث الأولية مثالا في هذا الفصل لتوضيح صقل الأفعال بشكل رياضي، وسنذكر بنى أحداث تم استخدامها لتغطية موضوع صقل الأحداث. وقبل الخوض في التعاريف الرياضية سنمهد الطريق من خلال مناقشة بعض المفاهيم الرئيسية في صقل الأحداث الخاص بالبنى الأولية حتى نصل تدريجيا لتعريف رياضي شامل.

٧.٢.١ الصقل باستخدام بنى خالية من التنافر

لنفترض وجود حدثين a, b بحيث يعتمد b على a، ولنفترض أنه يتم صقل الحدث a إلى بنية أولية A وصقل الحدث b إلى البنية B. فبسبب خاصية وراثة السببية عند صقل الأحداث سينجم أن

جميع أحداث البنية B معتمدة على جميع أحداث البنية A، أي أن على جميع أحداث البنية A الوقوع حتى يتم تمكين أحداث B.

فإذا فرضنا وجود تنافر في البنية A فلن تكون جميع أحداث هذه البنية A قابلة للتنفيذ في تشكيل واحد. ومنه ستصبح أحداث البنية B مستحيلة الحدوث. فلا يمكن استحدام بنى حاوية على أي تنافر عند صقل الأحداث باستخدام البنى الأولية.

بالمقابل فهذا شرط غير مطلوب عند الصقل باستخدام بنى أخرى من البنى التدفقية [28] حيث تسمح تلك البنى بوجود التنافرات بين مسببات الحدث، وتشترط حينها وقوع جميع المسببات الغير متنافرة حتى يتم تمكين الأحداث المعتمدة عليها.

٧.٢.٢ الصقل باستخدام بنى منتهية

تسمح بنى الأحداث الأولية بوجود مجموعات أحداث غير منتهية، ولكن تشترط أن تكون مجموعة مسببات أي حدث عبارة عن مجموعة منتهية. فإذا ثمت حدث A يعتمد عليه حدث آخر B بحيث يتم استبدال الحدث A ببنية أحداث غير منتهية، والحفاظ على الحدث B أثناء الصقل، يجب عندها أن تتم وراثة السببية كما نعلم. حيث سنحصل بالنتيجة على الحدث B معتمدا على مجموعة غير منتيهية من الأحداث، وبالتالي لن تكون بنية الأحداث التفصيلية بنية أولية.

وعليه يشترط عند صقل الأحداث باستخدام بنى أحداث أولية أن يتم استبدال الأحداث ببنى أولية منتهية، وهذا شبيه بمبدأ عدم استبدال الأحداث ببنى خالية.

٧.٢.٣ التعريف الرياضي

ليكن لدينا تابع للصقل معرف على أحداث بنية أولية ما بحيث يقابل كل حدث ببنية أولية (غير خالية)، خالية من التنافر، ومنتهية. عندها يتم تعريف البنية الناجمة عن صقل بنية أخرى على الشكل التالي المأخوذ من [28]. حيث يتم إرفاق الأحداث في البنية التفصيلية بالأحداث الأصلية في البنية التجريدية، وذلك منعا للالتباس عند وجود أحداث تفصيلية بنفس الاسم.

ولشرح ذلك بشكل مبسط، لنعد لمثال الشراء. فإذا كان حدث إدخال المعلومات جزء من حدث الدفع (كما رأينا)، وتم صقل حدث الشحن على أنه يبتدئ أيضا بحدث إدخال المعلومات (للزبون)، فحتى لا يختلط الحدثين في البنية التفصيلية الناجمة ويصبحان حدثاً واحداً، يتم ترميز الحدث التفصيلي الأول بالثنائية (دفع، إدخال المعلومات) والثاني (شحن، إدخال المعلومات). حيث يصبح هذا الموضوع ضرورة عند استخدام رموز (من حرف واحد عادة) لترميز الأحداث بدلا من استحدام الأفعال التي تمثلها تلك الأحداث.

Definition 2.7.1. *Let* $\pi = (E, \#, \leq)$ *be a prime event structure, and* ES_{prime} *be the set of all prime event structures. Let* $ref : E \to ES_{prime}$ *be the refienement function for* π *such that:*

$$\forall e \in E \,.\, \textit{ref(e) is finite, conflict-free and non-empty}$$

Then the refeienemnt of π *denoted as* $ref(\pi)$ *is an event structure* $(E', \#', \leq')$ *such that:*

- $E' = \{(e, e') \mid e \in E\, e' \in E_e\}$ *where* E_e *is the set of events of the structure* $ref(e)$

- $(e_1, e') \leq' (e_2, e'') \iff e_1 \leq e_2 \vee (e_1 = e_2 \wedge e' \leq_{e_1} e'')$ *where* $\leq_{e_1}$ *is the enabling relation of the structure* $ref(e_1)$
- $(e_1, e')\#'(e_2, e'') \iff e_1 \# e_2$

حيث نرى أن الأحداث في البنية الناجمة ترتبط مع بعضها بالعلاقة السببية إذا وفقط إذا كانت أحداثها الأصلية مرتبطة بعلاقة سببية في البنية المجردة (مثل حدث الطلب والدفع في مثالنا)، أو إذا كانت الأحداث التفصيلية تتبع لنفس الحدث في البنية المجردة وترتبط فيما بينها بعلاقة سببية (مثل حدثي الحصول على موافقة المصرف واقتطاع المبلغ التابعان لحدث الدفع في البنية المجردة). وهذا ما لا يسمح بإضافة ارتباطات سببية جديدة أو انتقاص علاقات سببية كانت موجودة في البنية التجريدية.

أما بالنسبة للسببية وبما أننا نستبعد البنى الحاوية على التنافر عند الصقل، تكون الأحداث في البنية التفصيلية متنافرة إذا وفقط إذا كانت أحداثها الأصلية على تنافر في البنية المجردة. وهذا لا يسمح بدوره بانتقاص تنافرات البنية المجردة أو الزيادة عليها. وبناء على هذين التعريفين للسببية والتنافر، نستنتج أن الصقل يحافظ على استقلالية الأحداث، فالأحداث المستقلة في البنى المجردة ستنتج أحداثا مستقلة في البنية التفصيلية عند الصقل وفق التعريف السابق.

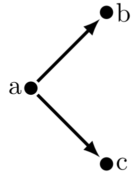
إضافة، يمكن البرهان، كما في [28]، بأن البنية (التفصيلية) المعرفة في هذا التعريف هي بحد ذاتها بنية أولية. فصقل البنى الأولية بهذا الشكل سينتج بالضرورة بنى أولية.

٧.٢.٤ التكافؤ في التشكيلات عند الصقل

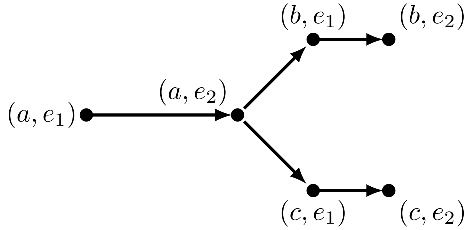
إن الهدف الرئيسي من تعريف صقل الأحداث بأسلوب رياضي، هو توضيح الترابط بين بنى الأحداث التي تنجم عن بعضها من خلال الصقل. وبما أن بنى الأحداث (وخاصة الأولية) تكتسب دلالاتها من خلال التشكيلات، فلا بد من إظهار الترابط بين بنى الأحداث الناجمة عن بعضها بالصقل من خلال إظهار الترابط بين التشكيلات الناجمة عن هذه البنى.

وبما أن الصقل يعنى بالمحافظة في البنى التفصيلية على ما هو مسموح في البنى المجردة، فيجب بالنسبة لكل تنفيذ في البنية الأصلية أن يوجد له تنفيذ في البنية التفصيلية يمثل صقلا له. وبالمقابل بما أن الصقل يعنى بأن لا تسمح البنى التفصيلية بما لم يكن مسموحا بالبنية المجردة، فيجب بالنسبة لكل تشكيل في البنية التفصيلية أن يكون صقلا لتشكيل في البنية الأصلية.

فبتعبير آخر، يجب أن تكون تشكيلات البنية التفصيلية عبارة عن تشكيلات البنية المجردة ولكن بعد صقل أحداثها، أي بعد استبدال كل حدث بتشكيل من البنية المقابلة له وفق الصقل. ولكن هنلك بعض الشروط لهذا الاستبدال. فلا يمكن مثلا استبدال حدث بتشكيل خال. فلنأخذ البنية المجردة التالية كمثال.



ولنفترض أنه تم صقل هذه البنية على النحو التالي:



ولنأخذ التشكيل $\{a, b\}$ من البنية المجردة، عندها إذا استبدلنا الحدث a بالتشكيل $\{(a, e_1), (a, e_2)\}$ واستبدلنا الحدث b بالتشكيل $\{(b, e_1)\}$ فسنحصل على المجموعة $\{(a, e_1), (a, e_2), (b, e_1)\}$ والتي تعتبر تشكيلا في البنية التفصيلية. وهذا غير ممكن إذا استبدلنا الحدث a بالتشكيل الخالي، فسنحصل عندها على المجموعة $\{(b, e_1)\}$ التي لا تعتبر تشكيلا في البنية التفصيلية.

بالمقابل فلا يمكن استبدال الحدث a في التشكيل $\{a, b\}$ بالتشكيل $\{(a, e_1)\}$ لأننا سنحصل على المجموعة $\{(a, e_1), (b, e_1)\}$ التي لا تعتبر تشكيلا في البنية التفصيلية. والسبب وراء ذلك أن الحدث a في التشكيل $\{a, b\}$ ليس أعظميا، أي هنلك أحداث أخرى مثل b معتمدة عليه، فلا يمكن حينها استبدال الحدث a إلا بتشكيل تام (Complete) يحتوي على جميع الأحداث الممكن وقوعها في البنية التي تم صقل الحدث a إليها. بالمقابل يمكن استبدال الحدث b في التشكيل $\{a, b\}$ بتشكيل غير مكتمل مثل $\{(b, e_1)\}$ وذلك لأنه ما من حدث في التشكيل $\{a, b\}$ يعتمد على b.

المبرهنة التالية مقتبسة من [28] وتوضح أن تشكيلات البنية التفصيلية ما هي إلا تشكيلات البنية المجردة بعد استبدال أحداثها بتشكيلات غير خالية، مع مراعاة التشكيلات المكتملة للأحداث غير الأعظمية.

Lemma 2.7.2. *Let $\pi = (E, \#, \leq)$ be a prime event structure, and $ref : E \to ES_{prime}$ be a refienement function. Let $X \in \mathrm{C}(\pi)$. We call X' a refienement of X by ref iff:*

- $X' = \bigcup_{e \in X} (\{e\} \times X_e)$ *where* $X_e \in \mathrm{C}(ref(e)) \setminus \emptyset$
- $\exists e' \in X \,.\, e \leq e' \implies X_e$ *is complete.*

Then $\mathrm{C}(ref(\pi)) = \bigcup_{X \in \mathrm{C}(\pi)} ref(X)$

٧.٣ الصقل في نماذج التوريق
Refinment in Interleaving Models

تعبر نماذج التزامن غير الحقيقي أو نماذج التوريق (Interleaving) عن الأحداث المستقلة من خلال إمكانية وقوعها بعد بعضها البعض بأي ترتيب، وليس مع بعضها البعض بنفس الوقت. وهذا ما يخلق إشكالا عند صقل الأحداث.

فلنتخيل المثال السابق، ولنلاحظ الحدثين b, c المستقلين، حيث يمكن في البنية السابقة اشتقاق الأثر a, b, c وكذلك الأثر a, c, b. وأما في البنية التفصيلية، فنلاحظ أنه يمكن اشتقاق الآثار:

- $(a, e_1), (a, e_2), (b, e_1), (c, e_1), (c, e_2)$
- $(a, e_1), (a, e_2), (c, e_1), (b, e_1), (c, e_2)$
- $(a, e_1), (a, e_2), (c, e_1), (c, e_2), (b, e_1)$

أما إذا كان لدينا نموذج تزامن غير حقيقي يعبر عن استقلالية b و c من خلال الأثرين b, c و c, b، وبعد صقل هذين الأثرين سنحصل إما على الأثر $(a, e_1), (a, e_2), (b, e_1), (c, e_1), (c, e_2)$ أو على

الأثر $(b, e_1), (c, e_2), (c, e_1), (a, e_2), (a, e_1)$، **ولكننا لن نحصل على الأثر** $(c, e_2), (b, e_1), (c, e_1), (a, e_2), (a, e_1)$.

82

الباب ٨

خاتمة

يقوم هذا الكتاب في الفصل الأول بتعريف الأحداث وعلاقاتها وكيفية تناولها من خلال بنى رياضية تسمى بنى الأحداث والتي تشكل إحدى النماذج القادرة على تناول ودراسة النظم المتزامنة وتحليلها.

يوضح الكتاب أيضا في الفصل الثاني كيف يمكن لهذه البنى التعبير عن سلوك النظم المتزامنة من خلال مفهوم التنفيذ بأشكاله المتعددة. حيث يمكن للتنفيذ أن يعبر عن الانتقالات كما في نموذج انتقال التشكيلات، أو عن ترتيب واستقلال الأحداث كما في المجموعات المرتبة، أو بشكل خطي تسلسلي كما في الآثار.

يعرف الكتاب بعدها في الفصل الثالث أشكالا متعددة لعلاقة التفعيل أو السببية بين الأحداث بما يمكّن من تعريف بدائل سببية

وخيارات في تفعيل الأحداث. ويقوم الكتاب بالمثل في الفصل الرابع بالنسبة لعلاقة التنافر حيث يعرف التنافر اللاتناظري أو علاقة الإقصاء وكذلك التنافر القابل للحل.

يسلط الكتاب الضوء على كيفية المقارنة بين بنى الأحداث المختلفة المطروحة، بأسلوب علمي دقيق يعرف أساسا واضحا للمقارنة، فبعض البنى تتطابق فيما بينها بالتشكيلات الناجمة بينما تختلف بالآثار أو بالمجموعات المرتبة، إلخ.

ينتقل الكتاب بعدها في الفصل الخامس لمنحى تطبيقي من خلال نمذجة سيناريوهات واقعية مثل القفل الميت والتنفيذ التام موظفا إياها لنمذجة بنية الاستبعاد المتبادل من خلال بنى الأحداث التدفقية.

بعدها يحاول الكتاب في الفصل السادس تسليط الضوء على نوع خاص من التزامن يدعى التزامن اللاتناظري مناقشا إشكاليات إعطاء دلالة رياضية له والنماذج التي يمكن استخدامها لإعطائه الدلالة كبنى الترتيب المتراصفة.

ينتقل الكتاب نهاية لتعريف نوع من العلاقات الجبرية بين بنى الأحداث، من خلال صقل الأفعال. حيث يوضح كيف ومتى يمكن القول عن بنية أحداث معينة أنها تمثل صقلا لبنية أخرى، بما يشكل نوعا من التشاكل (Homomorphism) الذي يحافظ على خواص البنى، أو ما هو مسموح وما هو ممنوع من التشكيلات.

وأخيرا يضيف الكتاب بعض الملحقات للتعريف بأنواع أخرى من بنى الأحداث تتمثل إما بإضافات كمية لبنى الأحداث كالبعد الزمني والاحتمالات، أو بتحسينات نوعية كعلاقة الأولوية والسببية الديناميكية.

الباب ١

ملحق: بنى أحداث أخرى

١.١ بنى الأحداث المثبطة Inhibitor Event Structures

تم في [5] تعريف بنى الأحداث المثبطة (Inhibitor Event Structures) بناء على بنى الأحداث الأولية. الفكرة الأساسية في هذه البنى أنه يمكن تعطيل حدث (عكس التفعيل) من خلال مجموعة من أحداث البنية، وأنه يمكن إعادة تفعيل ذلك الحدث من خلال مجموعة أحداث أخرى. يمكن لهذه العلاقة نمذجة (استيعاب) علاقة السببية في بنى الأحداث الأولية، وكذلك التنافر اللاتناظري في بنى الأحداث الرزمية الموسعة، وحتى علاقة السببية في البنى الرزمية.

١.٢ بنى الأحداث المزدوجة
Dual Event Structures

تم في [19, 23] تعريف بنى الأحداث المزدوجة (Dual Event Structures)، حيث يختلف التعريفان قليلا في المرجعين المذكورين، ففي [19] يتم تعريف هذه البنى بناء على بنى الأحداث الرزمية الموسعة، بينما يتم تعريف هذه البنى في [23] بناء على بنى الأحداث الرزمية. ولكن يتشارك كلا التعريفين في إسقاط شرط الاستقرار الموجود في البنى الرزمية والرزمية الموسعة، مما يؤدي إلى حالة الغموض السببي.

وبناء عليه ينفرد المؤلفون في [23] لإعطاء تفسيرات سببية مختلفة للغموض السببي. إن غياب شرط الاستقرار السببي يمكن بنى الأحداث المزدوجة من نمذجة (استيعاب) العديد من بنى الأحداث، وبالتالي أن تكون أكثر قدرة تعبيرية منهم، مثل بنى الأحداث الأولية، والرزمية، والمستقرة، وحتى الرزمية الموسعة في حال تم اعتماد التعريف المعتمد عليها.

إضافة لذلك تم توسيع نسخة بنى الأحداث المزدوجة المعتمدة على بنى الأحداث الرزمية الموسعة في [19] من خلال إضافة علاقة توريق (Interleaving) ثنائية بين الأحداث. فإذا ثمت حدثان مرتبطان بهذه العلاقة، فيمكنهما الوقوع بعد بعضهما البعض بأي ترتيب، ولكن ليس معا بنفس الوقت.

١.٣ بنى الأحداث والأولويات
Prioritized Event Structures

تم في [4] إضافة مفهوم أولويات وقوع الأحداث لعدة بنى أحداث مختلفة. حيث تمثل الأولويات آلية للتنافس بين الأحداث على الوقوع عندما تكون جميعها مفعلة. ولذلك تمت دراسة الأولويات من خلال الآثار في بنى الأحداث، وهذا ما يشابه تنافس حدثين للتنفيذ في بنية حاسوبية ذات معالج واحد.

أما الأحداث غير المفعلة فليست أصلا عرضة للتنافس ولا يمكن تطبيق مفهوم الأولوية عليها. ومنه تم في ذلك العمل تبيان أن الأولوية لا تطبق بين حدث معين والحدث المسبب له في البنى الأولية، وكذلك بين الأحداث المتنافرة. فهي لا تطبق إلا بين الأحداث المستقلة. وبشكل مشابه تمت أيضا إضافة الأولوية ودراسة علاقتها بالسببية في البنى الرزمية والرزمية الموسعة وكذلك المستقرة.

١.٤ السببية الديناميكية في بنى الأحداث
Dynamic Causality Event Structures

تم في [3, 1] إضافة مفهوم السببية الديناميكية لبنى أحداث مشتقة من البنى الأولية لا تحوي على خيارات لتفعيل الأحداث. حيث يمكن لحدث بوقوعه إسقاط السببية بين حدثين آخرين، أو إضافة سببية لم تكن موجودة أصلا بين الحدثين. أما بالنسبة لإسقاط السببية فقد تم في هذا العمل إيضاح أن إسقاط السببية $a \rightarrow b$ من

قبل c يشابه القول بأنه الحدث b يعتمد إما على الحدث a المسبب أو على الحدث c، وهذه سببية خيارية تشابه السببية المطروحة في بنى الأحداث المزدوجة.

وبالنسبة لإضافة السببية $a \to b$ من قبل حدث c فقد تم إظهار هذه السببية على أنها مشابهة للسببية الشرطية، بحيث أن الحدث a ضروري لوقوع الحدث b فقط في حال وقوع الحدث c. وبما أنه تمت إضافة السببية الديناميكية على بنى أحداث مشتقة من البنى الأولية شبيهة بالبنى التدفقية تسمح بأن يكون الحدث معتمدا على نفسه (ليكون بذلك حدثا مستحيلا)، أصبح من الممكن لحدث c أن يضيف لحدث a اعتمادية سببية على نفسه، أي $a \to a$ بحيث يصبح الحدث a مستحيلا. وهذا ما يشبه آلية الاستبعاد أو التنافر اللاتناظري بحيث أنه بوقوع الحدث c يتم استبعاد الحدث a.

ويمكن بناء عليه نمذجة التنافر التناظري أيضا من خلال جعل الحدث a يضيف الاعتمادية $c \to c$ وكذلك جعل c يضيف الاعتمادية $a \to a$. وأيضا يمكن من خلال الإضافات السببية نمذجة التنافر القابل للحل، وذلك بجعل الحدث b يضيف الاعتمادية $a \to c$ وجعل الحدث a أيضا يضيف الاعتمادية $b \to c$. فعند وقوع أحد الحدثين a, b لا يمكن وقوع الآخر إلا بوقوع الحدث c، وهذا ما شهدناه في بنى الأحداث ذات التنافر القابل للحل.

١.٥ بنى الأحداث الزمنية
Timed Event Structures

تم في [20, 19] إضافة مفهوم التأخير الزمني لأحداث البنى الرزمية الموسعة. فقد أضيفت وحدة زمنية (Time Unit) لكل رزمة من الأحداث، بحيث تمثل تلك الوحدة الزمنية التأخير الأعظمي

للحدث المفعل حتى يتم وقوعه ابتداء من لحظة تفعيله. وعليه فالأثر في تلك البنية عبارة عن تسلسل لثنائيات من الأحداث وأزمان وقوعها. ومن البديهي في تلك الآثار أن الأحداث الواردة أولا قد تم وقوعها في لحظات زمنية مبكرة مقارنة بتلك الأحداث التي تأتي في الأثر لاحقا. إضافة، يجب أن يكون زمن وقوع حدث ما في الأثر أكبر من زمن تفعيل ذلك الحدث.

تم أيضا في [9] إضافة التأخيرات الزمنية لبنى الأحداث إضافة لمجموعة من العمليات Operations المعرفة على الأحداث ذات التوقيع الزمني، مثل الاجتماع الفصلي (Disjoint Union) والسلسلة (Concatenation).

إضافة لذلك فقد تم في [19, 20] تطوير بنية للأحداث الطارئة (Urgent Events)، بناء على بنى الأحداث الرزمية الموسعة. حيث يجب على الأحداث الطارئة في تلك البنى الوقوع في حال تم تفعيلها، عند انقضاء مهلة زمنية معينة، وليس قبل انقضاء تلك المهلة أو بعدها. حيث يمكن استخدام هذه الأحداث لنمذجة انتهاء مهلة الانتظار (Timeout) كما في المؤقتات مثلا. فقد تم استخدامها في تلك المراجع لنمذجة انتهاء مهلة الانتظار في جبر المعالجات (LOTOS). وفي بنى الأحداث الطارئة هذه، يجب أن يكون الأثر تاما، أي حاويا على جميع الأحداث التي تم تمكينها في ذلك الأثر، والتي يجب وقوعها.

أخيرا، فقد تم في نفس المصادر [19] تطوير بنى أحداث زمنية أكثر تعقيدا مما سبق. حيث تقوم تلك البنى ليس فقط بتعريف الأحداث الطارئة و تحديد الزمن الأقصى (التأخير) لوقوع الأحداث بشكل عام، بل الزمن الأقل (Minimal Time) الواجب انقضاؤه حتى تتمكن الأحداث من الوقوع بعد تفعيلها. حيث يتم ذلك من خلال تحديد مجالات زمنية لوقوع الأحداث أو مجموعة من الأزمنة المنفصلة (Discrete Time Points).

١.٦ بنى الأحداث الاحتمالية
Probabilistic Event Strcutures

تم في [19, 32] إدخال مفهوم الاحتمالات لوقوع الأحداث، لإعطاء صبغة إحصائية لبنى الأحداث. حيث تم في [19] تجميع الأحداث في تجمعات (Clusters) بحيث يكون مجموع احتمالات الأحداث في قطاع ما هو واحد أي مئة بالمئة، وعلى هذه الأحداث أن تكون مفعلة بنفس المفعلات. فعندما تقع الأحداث المفعلة، سيكون هنلك مجموعة من الأحداث مرشحة للوقوع، مجموع احتمالاتها واحد.

الباب ب

ملحق: علاقة بنى الأحداث مع شبكات بتري وجبر المعالجات

تعتبر بنى الأحداث من النماذج الرياضية التي يمكن استخدامها لإعطاء دلالات رياضية لشبكات بتري وكذلك لجبر المعالجات. فقد تم تطوير الكثير من بنى الأحداث لهذا الغرض.

فقد تم استخدام بنى الأحداث الأولية كما في [35] لإعطاء دلالة لنوع محدد من شبكات بتري وهو شبكات بتري الآمنة (Safe Petri Nets).

وكذلك تم استخدام بنى الأحداث ذات التنافرات القابل للحل لإعطاء دلالة لشبكات بتري بشكل عام [30].

كما تم تطوير بنى أحداث المثبطات (Inhebitor Event Structures) في [5] لإعطاء الدلالة للأفعال المثبطة (Inhebitor

(Arcs في شبكات بتري ذات المثبطات (Inhebitor Petri Nets).
إضافة، فقد تم تطوير بنى الأحداث الرزمية في [22] لإعطاء دلالة لجبر المعالجات (LOTOS).

وبالمقابل يمكن استخدام بنى الأحداث التدفقية لإعطاء دلالة لنوع من شبكات بتري أوسع (أكثر تعبيرا) من الشبكات الآمنة، وهي شبكات بتري التدفقية (Flow Petri Nets) كما في [8].

وأخيرا، يمكن استخدام الحلقات السببية في بنى الأحداث التدفقية عند التركيب التفرعي للمعالجات Parallel Composition. وكذلك يمكن استخدام التنافر الانعكاسي (Reflexive Conflict) في نفس البنى لنمذجة التقييدات (Restrictions) في جبر المعالجات CSS.

الباب ج

قائمة المصطلحات المعربة

Concurrency	التزامن
Concurrency Theory	نظرية التزامن
Concurrent Systems	النظم المتزامنة
Concurrent	متزامن
Temporal Logic	منطق زمني
Linear Temporal Logic	المنطق الزمني الخطي
Computational Tree Logic	منطق الشجرة الحسابية
Web Services	خدمات الويب
Formal Methods	طرائق صورية
Verification	تحقق
Property	خاصية

Framework	منصة عمل
Event Structures	بنى الأحداث
Actor Model	نموذج الممثل
Model Checking	فحص النماذج
Event	حدث
Petri Nets	شبكات بتري
Safe Petri Nets	شبكات بتري الآمنة
flow Petri Nets	شبكات بتري التدفقية
Unfolding	بسط
Process Algebra	جبر المعالجات
Configuration	تشكيل
Trace	أثر
Simultaneously	بنفس الوقت
(Partially) Ordered Set, Poset	مجموعة مرتبة
Partial Order	ترتيب جزئي
Computation	الحوسبة
Abstraction	التجريد
Modeling	النمذجة
Causality	السببية
Conflict	التنافر
Independent Events	الأحداث المستقلة
Prime Event Structures	بنى الأحداث الأولية
Stable Event Structures	بنى الأحداث المستقرة
Bundle Event Structures	بنى الأحداث الرزمية
Extended Bundle Event Structures	بنى الأحداث الرزمية الموسعة
Asymmetric Event Structures	بنى الأحداث اللاتناظرية

Dual Event Structures	بنى الأحداث المزدوجة
Flow Event Structures	بنى الأحداث التدفقية
Sequential Composition	تركيب تسلسي
Parallel Composition	تركيب تفرعي
Dead Lock	القفل الميت
Termination	الانتهاء
Complete Configuration	التشكيل التام
Run, System Run	التنفيذ
Family of Configurations	عائلة التشكيلات
Family of Posets	عائلة المجموعات المرتبة
Remainder	الباقي
Causality Cycle	حلقة سببية
Causal Ambiguity	الغموض السببي
Causal Disambiguity	الوضوح السببي
Stability	الاستقرار
Expressive Power	القوة التعبيرية
Expressiveness	التعبيرية
More Expressive	أكثر تعبيرا
Bundle	الرزمة
Symmetric	تناظري
Asymmetric	لا تناظري
Anti-symmetric	ضد تناظري
Reflexive	انعكاسي
Transitive	متعدي
Consistency	الاتساق
Semantics	الدلالة ـ الدلالات

Maximal	أعظمي
Linear	خطي
Enable	فعّل ـ مكّن
Disable	عطّل
Interleaving	توريق
Concatenation	سلسلة
Conjunctive Normal Form	الشكل المعياري الوصلي
Disjunctive Normal Form	الشكل المعياري الفصلي
Secured	مؤمن
Prefix	البادئة
Action Refinement	صقل الأفعال
Process	معالجة
Action	فعل
Equivalence	التكافؤ
Stratified Order Structure, so-structure	المجموعة المرتبة المتراصفة
Closure	الإغلاق
Closed	مغلقة
Downward Closed	مغلقة للأسفل
Left Closed	مغلقة لليسار
Non-determinism	عدم التحديد
Configuration Transition	انتقال التشكيلات
Syntactic	نصي
Mutex	بنية الاستبعاد المتبادل
Timeout	انتهاء مهلة الانتظار
Critical Region	منطقة حرجة

Variable	متحول
Resource	مصدر
Urgent	طارئ
Operation	عملية
Homomorphism	تشاكل

المصادر

[1] Youssef Arbach. *On the Foundations of Dynamic Coalitions: Modeling Changes and Evolution of Workflows in Healthcare Scenarios.* PhD thesis, Technische Universität Berlin, 2016.

[2] Youssef Arbach, David Karcher, Kirstin Peters, and Uwe Nestmann. Dynamic Causality in Event Structures. In *Proceedings of Formal Techniques for Distributed Objects, Components, and Systems: 35th IFIP WG 6.1 International Conference, FORTE 2015, Held as Part of the 10th International Federated Conference on Distributed Computing Techniques, DisCoTec 2015, Grenoble, France, June 2-4, 2015*, pages 83–97. Springer International Publishing, 2015.

[3] Youssef Arbach, David S. Karcher, Kirstin Peters, and Uwe Nestmann. Dynamic Causality in Event Structures. *Logical Methods in Computer Science*, Volume 14, Issue 1, February 2018.

[4] Youssef Arbach, Kirstin Peters, and Uwe Nestmann. Adding Priority to Event Structures. In *Proceedings of Combined 20th International Workshop on Expressiveness in Concurrency and 10th Workshop on Structural Operational Semantics, EXPRESS/SOS 2013, Buenos Aires, Argentina, 26th August, 2013*, volume 120 of *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, pages 17–31, 2013.

[5] Paolo Baldan, Nadia Busi, Andrea Corradini, and G Michele Pinna. Domain and Event Structure Semantics for Petri Nets with Read and Inhibitor Arcs. *Theoretical Computer Science*, 323(1):129–189, 2004.

[6] Paolo Baldan, Andrea Corradini, and Ugo Montanari. Contextual Petri Nets, Asymmetric Event Structures, and Processes. *Information and Computation*, 171(1):1–49, 2001.

[7] Gérard Boudol and Ilaria Castellani. Permutation of transitions: An event structure semantics for CCS and SCCS. In *Linear Time, Branching Time and Partial Order in Logics and Models for Concurrency*, volume 354 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 411–427. Springer Berlin Heidelberg, 1989.

[8] Gérard Boudol and Ilaria Castellani. Flow Models of Distributed Computations: Event Structures and Nets. Technical report, INRIA, 1991.

[9] Ross Casley, Roger F Crew, José Meseguer, and Vaughan Pratt. Temporal Structures. *Mathematical Structures in Computer Science*, 1(02):179–213, 1991.

[10] Simon Castellan, Pierre Clairambault, Silvain Rideau, and Glynn Winskel. Games and strategies as event structures. *Logical Methods in Computer Science*, 2017.

[11] Ruggero Costantini and Arend Rensink. Abstraction and Refinement in Configuration Structures. Hildesheimer Informatik-Bericht 18/92, Institut für Informatik, University of Hildesheim, Germany, 1992.

[12] Milton Rafael da Silva, Pedro Henrique Ferreira Machado, Luiz Edival de Souza, and Carlos Waldecir de Souza. Colored petri net modeling of communication systems based on iec 61850. In *2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, pages 1001–1006. IEEE, 2017.

[13] Philippe Darondeau and Pierpaolo Degano. Event Structures, Causal Trees, and Refinements. In *Mathematical Foundations of Computer Science 1990*, volume 452 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 239–245. Springer Berlin Heidelberg, 1990.

[14] Philippe Darondeau and Pierpaolo Degano. Refinement of actions in event structures and causal trees. *Theoretical Computer Science*, 118(1):21–48, 1993.

[15] Pallab Dasgupta, Jatindra Kumar Deka, and Partha Pratim Chakrabarti. Model checking on timed-event structures. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 19(5):601–611, May 2000.

[16] Andrea Ferrara. Web services: A process algebra approach. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Service Oriented Computing*, ICSOC '04, page 242–251, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.

[17] PW Hoogers, HCM Kleijn, and PS Thiagarajan. An event structure semantics for general Petri nets. *Theoretical Computer Science*, 153(1–2):129–170, 1996.

[18] Ryszard Janicki and Maciej Koutny. Semantics of Inhibitor Nets. *Information and Computation*, 123(1):1–16, 1995.

[19] Joost-Pieter Katoen. *Quantitative and Qualitative Extensions of Event Structures.* PhD thesis, University of Twente, 1996.

[20] Joost-Pieter Katoen, Rom Langerak, Ed Brinksma, Diego Latella, and Tommaso Bolognesi. A Consistent Causality-Based View on a Timed Process Algebra Including Urgent Interactions. *Formal Methods in System Design*, 12(2):189–216, March 1998.

[21] Leslie Lamport. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. *Commun. ACM*, 21(7):558–565, July 1978.

[22] Rom Langerak. *Transformations and Semantics for LOTOS*. PhD thesis, Universiteit Twente, 1992.

[23] Rom Langerak, Ed Brinksma, and Joost-Pieter Katoen. Causal ambiguity and partial orders in event structures. In *Proceedings of CONCUR*, Lecture Notes in Computer Science, pages 317–331. Springer, 1997.

[24] Mogens Nielsen, Gordon Plotkin, and Glynn Winskel. Petri Nets, Event Structures and Domains, Part I. *Theoretical Computer Science*, 13(1):85–108, 1981.

[25] Arend Rensink. Posets for Configurations! In *Proceedings of CONCUR*, volume 630 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 269–285. Springer Berlin Heidelberg, 1992.

[26] Arend Rensink. *Models and Methods for Action Refinement*. PhD thesis, University of Twente, 1993.

[27] Arend Rensink. An Event-Based SOS for a Language with Refinement. In *Structures in Concurrency Theory*, Workshops in Computing, pages 294–309, Berlin Germany, 1995. Springer Verlag.

[28] Rob van Glabbeek and Ursula Goltz. Refinement of Actions in Causality Based Models. In *Stepwise Refinement of Distributed Systems Models, Formalisms, Correctness*, volume 430 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 267–300. Springer Berlin Heidelberg, 1990.

[29] Rob van Glabbeek and Ursula Goltz. Refinement of actions and equivalence notions for concurrent systems. *Acta Informatica*, 37:229–327, 2001.

[30] Rob van Glabbeek and Gordon Plotkin. Event Structures for Resolvable Conflict. In *Mathematical Foundations of Computer Science 2004*, volume 3153 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 550–561. Springer Berlin Heidelberg, 2004.

[31] Rob van Glabbeek and Gordon Plotkin. Configuration structures, event structures and Petri nets. *Theoretical Computer Science*, 410(41):4111–4159, 2009.

[32] Daniele Varacca, Hagen Völzer, and Glynn Winskel. Probabilistic Event Structures and Domains. In *CONCUR 2004 - Concurrency Theory*, volume 3170 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 481–496. Springer Berlin Heidelberg, 2004.

[33] Glynn Winskel. *Events in Computation*. PhD thesis, University of Edinburgh, 1980.

[34] Glynn Winskel. Event structures. In *Petri Nets: Applications and Relationships to Other Models of Concurrency*, volume 255 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 325–392. Springer Berlin Heidelberg, 1987.

[35] Glynn Winskel. An Introduction to Event Structures. In *Linear Time, Branching Time and Partial Order in Logics*

and Models for Concurrency, School/Workshop, pages 364–397, London, UK, UK, 1989. Springer-Verlag.

بنى الأحداث
مدخل إلى نظرية التزامن

يتطرق هذا الكتاب لنظرية التزامن (Concurrency Theory) كإحدى نظريات الحوسبة، من خلال بنى الأحداث (Event Structures) والتي تعد إحدى النماذج الرياضية القادرة على دراسة النظم المتزامنة (Concurrent Systems) وتحليلها. يوضح الكتاب مفهوم الحدث Event وآليات تكراره وعلاقات الأحداث ببعضها كالسببية (Causality) والتنافر (Conflict)، إضافة لمفهوم التنفيذ (System Run) الذي يعبر عن سلوك النظم المدروسة.

يسلط الكتاب الضوء على كيفية المقارنة بين بنى الأحداث المختلفة، بأسلوب علمي يعرّف أساسا واضحا للمقارنة، ويقوم بإعطاء الأمثلة عن استخدام تلك البنى من خلال نمذجة القفل الميت (Dead Lock) وبنية الاستبعاد المتبادل (Mutex) وغيرها. يحاول الكتاب تسليط الضوء أيضا على نوع خاص من التزامن يدعى التزامن اللاتناظري مناقشا إشكاليات إعطاء دلالة رياضية (Semantic) له.

ينتقل الكتاب نهاية لتعريف صقل الأفعال (Action Refinement) كنوع من العلاقات الجبرية بين بنى الأحداث. حيث يوضح كيفية الانتقال من المستوى المجرد في التصميم (Design) الخاص بالنظم المتزامنة إلى المستوى التفصيلي في التحقيق (Implementation) لتلك النظم.

وأخيرا يضيف الكتاب بعض الملحقات للتعريف بإضافات كمية لبنى الأحداث كالبعد الزمني والاحتمالات، أو بتحسينات نوعية كعلاقة الأولوية والسببية الديناميكية.

منظمة المجتمع العلمي العربي
Arab Scientific Community Organization

9 781916 076440