

UNIVERSITY OF CRETE - HERAKLION GREECE
DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE
FACULTY OF SCIENCES AND ENGINEERING

A Formal Theory for Reasoning About Action, Knowledge and Time

by

Theodore PATKOS

In partial fulfillment of the requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy

September 2010

A Formal Theory for Reasoning About Action, Knowledge and Time

Abstract: Aiming at achieving a proper regulation of their behavior in real-world environments, participating agents need to reason not only about the specifications of the environment they inhabit, but also about their own knowledge concerning its current state by exploiting information acquired at run-time. Considering the highly dynamic nature of most complex domains, the study of knowledge evolution over time is a critical aspect. In this thesis, we develop a *unified formal theory of action, knowledge and time* using the language of the Event Calculus and automate the process of reasoning about a wide range of commonsense phenomena.

Traditionally, epistemic reasoning has been structured around the highly expressive but computationally expensive "possible worlds" specifications. Recent theories adopt alternative representations for knowledge, dismissing the accessibility relation of possible worlds and promising more efficient reasoning in classes of restricted expressiveness. The framework we propose combines the full expressive power of the possible worlds semantics with the benefits of alternative approaches, building on a proper handling of a type of causal dependencies that emerge among partially known world aspects. We investigate the properties of these so called *hidden causal dependencies* and develop a provably sound and complete axiomatization that is independent of the underlying formalism. We show correctness properties by studying the correlation of the theory with an epistemic formalism that implements the standard definition for knowledge, based on a recently proposed branching version of the Event Calculus.

Furthermore, we investigate a number of different extensions of the basic axiomatization augmenting the mental state of intelligent agents with essential cognitive skills, such as the ability to remember and forget, to reason about physical actions, to handle complex ramifications in partially observable domains, and others. We demonstrate the potential of the theory by modeling complex benchmark problems proposed in relevant literature, as well as scenarios that emerge in the highly demanding nascent field of Ambient Intelligence. Finally, we also describe the design of a reasoner that can accommodate both epistemic and online reasoning and present a way to implement the framework using logic programming languages.

Keywords: Reasoning about Change and Causality, Epistemic Reasoning, Event Calculus, Cognitive Robotics, Ambient Intelligence

Supervisor:
Dimitris Plexousakis
Professor of Computer Science
University of Crete

Μια Τυπική Θεωρία Συλλογιστικής με βάση τη Δράση, τη Γνώση και το Χρόνο

Περίληψη: Με στόχο την επίτευξη μιας ορθά ορισμένης συμπεριφοράς σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα, οι μετέχοντες πράκτορες απαιτείται να εκτελούν διεργασίες συλλογιστικής όχι μόνο λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές του περιβάλλοντος στο οποίο επιδρούν, αλλά και με βάση τη γνώση που διαθέτουν για την τρέχουσα κατάσταση, αξιοποιώντας πληροφορία που αποκτάται σε χρόνο εκτέλεσης. Συνυπολογίζοντας την ιδιαίτερα δυναμική φύση των περισσότερων σύνθετων πεδίων, η μελέτη της κλιμάκωσης της γνώσης σε σχέση με το χρόνο συνιστά μια εξίσου κρίσιμη παράμετρο. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύσσουμε μια *ενοποιημένη τυπική θεωρία δράσης, γνώσης και χρόνου* με χρήση του Λογισμού Συμβάντων και αυτοματοποιούμε τη διαδικασία συλλογιστικής για ένα ευρύ φάσμα φαινομένων κοινής λογικής.

Παραδοσιακά, η συλλογιστική γνώσης προδιαγράφεται γύρω από την ιδιαίτερα εκφραστική, αλλά δαπανηρή υπολογιστικά μέθοδο των πιθανών κόσμων. Η τρέχουσα έρευνα υιοθετεί εναλλακτικές αναπαραστάσεις για τη γνώση, απαλείφοντας τη σχέση προσβασιμότητας των πιθανών κόσμων και παρέχοντας εγγυήσεις αποδοτικής εξαγωγής συμπερασμάτων σε κλάσεις περιορισμένης εκφραστικότητας. Το πλαίσιο εργασίας που προτείνουμε συνδυάζει την πλήρη εκφραστική δύναμη της σημασιολογίας των πιθανών κόσμων με τα οφέλη των εναλλακτικών προσεγγίσεων, βασιζόμενο στον αποδοτικό χειρισμό μιας κατηγορίας αιτιατών εξαρτήσεων που ανακύπτουν μεταξύ παραμέτρων κόσμου που είναι μερικώς αντιληπτές. Εξετάζουμε τις ιδιότητες αυτών των επονομαζόμενων *κρυφών αιτιακών εξαρτήσεων* και αναπτύσσουμε μια ορθή και πλήρη αξιωματοποίηση, ανεξάρτητη του υποκείμενου φορμαλισμού μοντελοποίησης. Η απόδειξη των ιδιοτήτων ορθότητας επιτυγχάνεται μέσω της συσχέτισης με ένα νέο φορμαλισμό που υλοποιεί τον καθιερωμένο ορισμό γνώσης και βασίζεται στην προσφάτως προταθείσα έκδοση ενός διακλαδιζόμενου Λογισμού Συμβάντων.

Επιπρόσθετα, μελετάμε ένα πλήθος επεκτάσεων της βασικής αξιωματοποίησης που επαυξάνουν τη νοητική ικανότητα ευφύων πρακτόρων με σημαντικές γνωστικές δεξιότητες, όπως την ικανότητα διατήρησης ή απώλειας γνώσης, τη δυνατότητα συλλογιστικής ως προς φυσικές ενέργειες, το χειρισμό σύνθετων παρενεργειών σε μερικώς παρατηρήσιμα περιβάλλοντα

κ.α. Παρουσιάζουμε τη δυναμική της θεωρίας μέσω μοντελοποίησης προβλημάτων αναφοράς σε συναφή πεδία, καθώς επίσης μέσω σεναρίων που ανακύπτουν στην ιδιαίτερα απαιτητική περιοχή της Διάχυτης Νοημοσύνης. Τέλος, παρουσιάζουμε το σχεδιασμό ενός εργαλείου συλλογιστικής που μπορεί να υποστηρίξει απόκτηση γνώσης σε πραγματικό χρόνο και περιγράφουμε τον τρόπο που μπορεί να υλοποιηθεί το ευρύτερο πλαίσιο εργασίας με χρήση γλωσσών λογικού προγραμματισμού.

Λέξεις-κλειδιά: Συλλογιστική Αλλαγής και Αιτιότητας, Επιστημική Συλλογιστική, Λογισμός Συμβάντων, Γνωσιακή Ρομποτική, Διάχυτη Νοημοσύνη

Επόπτης Καθηγητής:

Δημήτρης Πλεξουσάκης
Καθηγητής Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης
