

# Relazione Finale Progetto PRIN 2020 RIPER

Aniello Murano

Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy

[nello.murano@gmail.com](mailto:nello.murano@gmail.com)

30/09/2025

## Abstract

La presente relazione tecnico-scientifica sintetizza le attività svolte e soprattutto i lavori scientifici prodotti per il progetto PRIN 2020 “Resilient AI-Based Self-programming and Strategic Reasoning (RIPER)” (codice progetto 20203FFYLK), svolte presso l’unità di ricerca dell’Università degli Studi di Napoli Federico II (UNINA) nel periodo 1 giugno 2022 – 31 maggio 2025. Riper ha visto come Responsabile scientifico UNINA il sottoscritto Prof. Aniello Murano. L’intero progetto è stato coordinato a livello nazionale dal Prof. Giuseppe De Giacomo e ha coinvolto, oltre all’unità UNINA, unità afferenti alle Università di Brescia e di Trento, coordinate rispettivamente dai Proff. Alfonso Gerevini e Marco Roveri.

L’obiettivo generale di RIPER è stato quello di sviluppare metodologie per la progettazione di sistemi di intelligenza artificiale resilienti, capaci cioè di autoprogrammarsi e di adattare autonomamente il proprio comportamento in risposta alle incertezze e ai cambiamenti dell’ambiente, integrando tecniche di pianificazione, sintesi di strategie, apprendimento e ragionamento formale. In questo quadro, l’unità UNINA ha contribuito in modo specifico alla fondazione logico-formale della resilienza in sistemi multiagente, con particolare attenzione al ragionamento strategico e alla rappresentazione della conoscenza in presenza di incertezza.

## 1. Obiettivi scientifici dell’Unità UNINA

L’attività dell’unità UNINA si è concentrata su tre assi principali:

1) Definizione di modelli formali di sistemi multiagente incerti basati su concurrent game structures (CGS), in cui l’incertezza è rappresentata attraverso:

- informazione imperfetta (imperfect information);
- probabilità;
- valutazioni fuzzy/pesate delle proposizioni atomiche.

2) Sviluppo e studio di logiche strategiche per la resilienza, in particolare estensioni e varianti di:

- Alternating-time Temporal Logic (ATL);
- Strategy Logic;

arricchite con operatori in grado di catturare aspetti quantitativi (probabilità, pesi) e proprietà di robustezza e tolleranza a eventi imprevisti.

3) Analisi algoritmica e verifica formale di tali modelli e logiche, con enfasi su:

- sintesi automatica di strategie resilienti;
- model checking strategico sotto incertezza;
- studio della complessità computazionale e dei trade-off tra espressività e decidibilità.

Questi obiettivi sono stati perseguiti in stretta complementarità rispetto alle unità maggiormente focalizzate sugli aspetti di pianificazione strategica dinamica automatica, fornendo al progetto RIPER una base teorica solida per la specifica e la verifica delle proprietà di resilienza.

## **2. Modelli di sistemi multi-agente con incertezza**

Un primo filone di lavoro ha riguardato l'estensione delle concurrent game structures classiche a scenari in cui l'incertezza è intrinseca.

Sono stati studiati modelli in cui gli agenti operano sotto informazione imperfetta, avendo a disposizione solo una visione parziale dello stato globale del sistema. In tali contesti, le strategie non possono dipendere dallo stato "vero", ma solo dalle informazioni osservabili e dalla conoscenza accumulata nel tempo.

È stata considerata l'integrazione della probabilità nei modelli, sia come fonte di non-determinismo probabilistico dell'ambiente, sia come modo per esprimere l'affidabilità delle azioni e dei canali di comunicazione tra agenti.

In una direzione ancora più generale, sono stati esplorati modelli in cui le proposizioni atomiche sono pesate (approccio fuzzy o pesato), in modo da rappresentare gradi di soddisfacimento di proprietà, livelli di qualità del servizio, o diversi gradi di criticità di eventi avversi.

Tali estensioni consentono di modellare in maniera fine scenari di resilienza, in cui non è sufficiente che un sistema "funzioni", ma è necessario che funzioni in modo robusto, adattivo e possibilmente ottimale, anche a fronte di osservazioni parziali e di eventi imprevisti.

## **3. Logiche strategiche per la resilienza**

Il secondo grande filone di ricerca dell'unità ha riguardato lo studio di logiche strategiche per la specifica di proprietà complesse di sistemi multi-agente resilienti.

Sono state analizzate e utilizzate logiche della famiglia di ATL (Alternating-time Temporal Logic), adattandole a contesti con informazione imperfetta e probabilità, al fine di esprimere frasi del tipo: "Una certa coalizione di agenti ha una strategia che garantisce il raggiungimento di un obiettivo con probabilità almeno  $p$ , nonostante i guasti o le azioni avverse dell'ambiente".

È stata approfondita la Strategy Logic, che consente di ragionare in maniera esplicita sulle strategie come oggetti di primo ordine. All'interno del progetto, tali formalismi sono stati

impiegati (ed estesi) per:

- modellare strategie resilienti, che includono meccanismi di ripianificazione o di riorganizzazione della cooperazione tra agenti;
- esprimere proprietà di tipo “graceful degradation” (il sistema mantiene un certo livello di funzionalità anche in presenza di degradazioni);
- formalizzare concetti di robustezza quantitativa, ad esempio specificando che una proprietà deve essere soddisfatta con alta probabilità o con un certo livello di confidenza.

In tutte queste attività, un ruolo importante è stato svolto dall’interazione fra ragionamento strategico e rappresentazione della conoscenza, ad esempio nel legare le capacità degli agenti di reagire in modo resiliente a ciò che essi sanno o non sanno sullo stato del sistema e sugli altri agenti.

#### **4. Verifica, sintesi e strumenti prototipali**

Sul piano algoritmico, l’unità UNINA ha contribuito allo studio di tecniche di model checking e sintesi di strategie per i modelli e le logiche sopra descritti.

Sono stati analizzati problemi di verifica di proprietà strategiche in presenza di informazione imperfetta e probabilità, mettendo in luce le condizioni in cui la verifica è decidibile e i relativi costi computazionali.

Sono state investigate procedure di sintesi automatica di strategie, volte a determinare, quando possibile, strategie resilienti che soddisfano le specifiche date nella logica scelta, anche tenendo conto di vincoli probabilistici o fuzzy.

Alcune delle tecniche sviluppate sono state implementate in forma di strumenti prototipali, utilizzabili come base per futuri tool più completi da integrare in pipeline di progettazione di sistemi di AI resilienti.

Questi contributi dialogano con i risultati delle altre unità del progetto su pianificazione resiliente e sistemi robotici, dove la nozione di strategia formale si traduce in piani o politiche di controllo effettivamente eseguibili.

#### **5. Formazione, reclutamento e impatto sulla comunità**

Il progetto RIPER ha avuto un impatto significativo anche sul piano della formazione avanzata presso UNINA. I fondi PRIN hanno sostenuto:

- borse di ricerca su tematiche coerenti con il progetto, con temi esplicitamente collegati a “Resilient AI-Based Self-Programming and Strategic Reasoning”;
- assegni di ricerca e contratti per giovani studiosi, specificamente dedicati agli aspetti formali del ragionamento strategico automatizzato e allo sviluppo di modelli e logiche per la resilienza nei sistemi multiagente.

Tali attività hanno contribuito alla creazione di un gruppo di ricerca coeso e interdisciplinare su tematiche di logica, sistemi multi-agente e intelligenza artificiale

resiliente, favorendo la crescita scientifica di dottorandi, assegnisti e giovani ricercatori, nonché la loro integrazione nella comunità nazionale e internazionale del settore.

I risultati ottenuti sono stati diffusi mediante pubblicazioni su riviste e atti di conferenze internazionali di riferimento nei settori dei sistemi multiagente, della logica in informatica e dell'intelligenza artificiale, nonché tramite presentazioni a workshop e seminari, contribuendo alla visibilità del progetto RIPER e della sua unità UNINA all'interno della comunità scientifica.

Sono stati poi realizzati lavori in ambito medico dove la componente logico-strategico ha avuto un ruolo fondamentale nella parte decisionale, realizzando di fatto metodi ibridi/neuro-simbolici.

## **6. Conclusioni e prospettive future**

Nel complesso, l'unità UNINA del PRIN RIPER ha fornito contributi rilevanti alla comprensione formale della resilienza nei sistemi di intelligenza artificiale, in particolare:

- proponendo e studiando modelli di sistemi multiagente incerti basati su concurrent game structures con informazione imperfetta, probabilità e pesi/fuzzy;
- sviluppando ed estendendo logiche strategiche (ATL, Strategy Logic e loro varianti) in grado di catturare proprietà sofisticate di robustezza, adattività e tolleranza ai guasti;
- analizzando problemi di verifica e sintesi di strategie resilienti e ponendo le basi per strumenti automatici a supporto della progettazione di sistemi AI affidabili.

Questi risultati rappresentano un tassello essenziale nella visione integrata di RIPER, che mira a combinare metodi formali, pianificazione, apprendimento e robotica per realizzare sistemi AI in grado non solo di raggiungere obiettivi complessi, ma di farlo in modo resiliente, continuando a funzionare e ad adattarsi anche in presenza di incertezza, parzialità dell'informazione e perturbazioni dell'ambiente.

Le linee di ricerca avviate nel progetto proseguiranno oltre la sua conclusione, aprendo la strada a ulteriori sviluppi su:

- logiche strategiche sempre più espressive ma trattabili;
- integrazione più stretta tra ragionamento formale e metodi di apprendimento;
- applicazioni a scenari reali di sistemi multiagente cooperativi e infrastrutture critiche, in cui la resilienza non è una proprietà accessoria, ma un requisito fondamentale.

## Reference

1. Munique Mittelmann, Bastien Maubert, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Formal verification and synthesis of mechanisms for social choice. *Artif. Intell.* 339: 104272 (2025)
2. Davide Catta, Jean Leneutre, Vadim Malvone, Aniello Murano: A formal approach to attack graphs. *Ann. Math. Artif. Intell.* 93(4): 589-610 (2025)
3. Youcef Djenouri, Michal Tomasz Godziszewski, Fabio A. A. Andrade, Gautam Srivastava, Ahmed Nabil Belbachir, Aniello Murano: Game-Theoretic Consensus Deep Learning for Adaptive Flood Prediction in Digital Twin Environments. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote. Sens.* 18: 21355-21366 (2025)
4. Andrea Capone, Laura Bozzelli, Davide Catta, Vadim Malvone, Aniello Murano: An Intuitionistic Version of Computation Tree Logic, *EUMAS 2025*
5. Marco Aruta, Vadim Malvone, Aniello Murano: S4H: A Tool for Synthesizing Human-Like Strategies, *EUMAS 2025*
6. Marco Aruta, Ciro Listone, Giuseppe Murano, Aniello Murano: ADNF-Clustering: An Adaptive and Dynamic Neuro-Fuzzy Clustering for Leukemia Prediction, *Healthcom 2025*
7. Marco Aruta, Ciro Listone, Giuseppe Murano, Aniello Murano: L-CNN: A Convolutional Neural Network for Leukemia Prediction, *KES IN MED 25*
8. Andrea Capone, Laura Bozzelli, Davide Catta and Aniello Murano: An Intuitionistic Version of Alternating-Time Temporal Logic, *KR 2025*
9. Yifan He, Munique Mittelmann, Aniello Murano, Abdallah Saffidine and Michael Thielscher: Repairing General Game Descriptions, *KR 2025*
10. Raphaël Berthon, Joost-Pieter Katoen, Munique Mittelmann, Aniello Murano: Robust Strategies for Stochastic Multi-Agent Systems. *AAMAS 2025*: 2437-2439
11. Marco Aruta, Vadim Malvone, Aniello Murano, Vincenzo Pio Palma, Salvatore Romano: FindMe: A Prototype Videogame AI based on CTL with an Optimized Synthesis Algorithm. *AAMAS 2025*: 2997-2999
12. Wojciech Jamroga, Michal Tomasz Godziszewski, Aniello Murano: Strategies, Credences, and Shannon Entropy: Reasoning about Strategic Uncertainty in Stochastic Environments. *IJCAI 2025*: 126-134
13. Davide Catta, Rustam Galimullin, Aniello Murano: First-Order Coalition Logic. *IJCAI 2025*: 4410-4418
14. Laura Bozzelli, Bastien Maubert, Aniello Murano: On the Complexity of Model Checking Knowledge and Time. *ACM Trans. Comput. Log.* 25(1): 8:1-8:42 (2024)
15. Raphaël Berthon, Joost-Pieter Katoen, Munique Mittelmann, Aniello Murano: Natural Strategic Ability in Stochastic Multi-Agent Systems. *AAAI 2024*: 17308-17316
16. Francesco Belardinelli, Wojtek Jamroga, Munique Mittelmann, Aniello Murano: Verification of Stochastic Multi-Agent Systems with Forgetful Strategies. *AAMAS 2024*: 160-169
17. Davide Catta, Jean Leneutre, Vadim Malvone, Aniello Murano: Obstruction Alternating-time Temporal Logic: A Strategic Logic to Reason about Dynamic Models. *AAMAS 2024*: 271-280

18. Wojciech Jamroga, Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Giuseppe Perelli: Playing Quantitative Games Against an Authority: On the Module Checking Problem. AAMAS 2024: 926-934
19. Michal Tomasz Godziszewski, Davide Catta, Aniello Murano: Temporal Truth in the Limit: Yablo's Paradox in LTLf and over Potentially Infinite Traces. EUMAS 2024: 110-128
20. Marco Aruta, Aniello Murano, Salvatore Romano: ATL for Dynamic Gaming Environments. EUMAS 2024: 129-137
21. Francesco Spegni, Luca Spalazzi, Roberto Rosetti, Aniello Murano: Parameter Synthesis for Families of Markov Chains with an Application to Multi-agent Systems Privacy. EUMAS 2024: 159-178
22. Aniello Murano: Formal Aspects of Strategic Reasoning. KoDis+CAKR+SYNERGY@KR 2024
23. Yifan He, Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Abdallah Saffidine, Michael Thielscher: Verification of General Games with Imperfect Information Using Strategy Logic. KR 2024
24. David Hyland, Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Giuseppe Perelli, Michael J. Wooldridge: Incentive Design for Rational Agents. KR 2024
25. Angelo Ferrando, Giulia Luongo, Vadim Malvone, Aniello Murano: Theory and Practice of Quantitative ATL. PRIMA 2024: 231-247
26. Marco Aruta, Vadim Malvone, Aniello Murano: Development of Natural Strategies in Strategic Logics (short paper). AI4CC-IPS-RCRA-SPIRIT@AI\*IA 2024
27. Michal Tomasz Godziszewski, Davide Catta, Aniello Murano: Temporal (Non-)Paradox: Yablo's Sequences in LTL over Finite Traces (short paper). AI4CC-IPS-RCRA-SPIRIT@AI\*IA 2024
28. Patricia Bouyer, Orna Kupferman, Nicolas Markey, Bastien Maubert, Aniello Murano, Giuseppe Perelli: Reasoning about Quality and Fuzziness of Strategic Behaviors. ACM Trans. Comput. Log. 24(3): 21:1-21:38 (2023)
29. Munyque Mittelmann, Bastien Maubert, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Formal Verification of Bayesian Mechanisms. AAAI 2023: 11621-11629
30. Aniello Murano, Mimmo Parente, Silvia Stranieri: A Multi-Agent Game for Sentiment Analysis. IPS-RCRA-SPIRIT@AI\*IA 2023
31. Davide Catta, Antonio Di Stasio, Jean Leneutre, Vadim Malvone, Aniello Murano: A Game Theoretic Approach to Attack Graphs. ICAART (1) 2023: 347-354
32. Aniello Murano, Silvia Stranieri, Munyque Mittelmann: Multi-Agent Parking Problem with Sequential Allocation. ICAART (3) 2023: 484-492
33. Francesco Belardinelli, Angelo Ferrando, Wojciech Jamroga, Vadim Malvone, Aniello Murano: Scalable Verification of Strategy Logic through Three-Valued Abstraction. IJCAI 2023: 46-54
34. Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Discounting in Strategy Logic. IJCAI 2023: 225-233
35. Aniello Murano, Daniel Neider, Martin Zimmermann: Robust Alternating-Time Temporal Logic. JELIA 2023: 796-813

36. Francesco Belardinelli, Wojciech Jamroga, Munyque Mittelmann, Aniello Murano: Strategic Abilities of Forgetful Agents in Stochastic Environments. KR 2023: 726-731
37. Francesco Noviello, Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Silvia Stranieri: Parking Problem with Multiple Gates. PAAMS 2023: 213-224
38. Angelo Ferrando, Vadim Malvone, Aniello Murano, Silvia Stranieri: HYASM: A Tool to Verify Hierarchical Systems. WETICE 2023: 1-6
39. Davide Catta, Vadim Malvone, Aniello Murano: Reasoning about Intuitionistic Computation Tree Logic. AREA@ECAI 2023: 42-48
40. Benjamin Aminof, Aniello Murano, Sasha Rubin, Florian Zuleger: Verification of agent navigation in partially-known environments. Artif. Intell. 308: 103724 (2022)
41. Laura Bozzelli, Aniello Murano, Adriano Peron: Context-free timed formalisms: Robust automata and linear temporal logics. Inf. Comput. 283: 104673 (2022)
42. Francesco Belardinelli, Wojtek Jamroga, Vadim Malvone, Munyque Mittelmann, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Reasoning about Human-Friendly Strategies in Repeated Keyword Auctions. AAMAS 2022: 62-71
43. Munyque Mittelmann, Bastien Maubert, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Synthesis of Mechanisms with Strategy Logic. ICTCS 2022: 47-52
44. Munyque Mittelmann, Bastien Maubert, Aniello Murano, Laurent Perrussel: Automated Synthesis of Mechanisms. IJCAI 2022: 426-432
45. Nathanaël Fijalkow, Bastien Maubert, Aniello Murano, Sasha Rubin, Moshe Y. Vardi: Public and Private Affairs in Strategic Reasoning. KR 2022