

# Soluzioni di Planning and Scheduling per collaborazione Uomo-Robot

Alessandro Umbrico, Amedeo Cesta, Andrea Orlandini

CINI LAB AIIS - Nodo DSU-CNR  
Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
nome.cognome@istc.cnr.it

## Abstract

Questo breve articolo descrive sinteticamente alcune attività di ricerca svolte nel laboratorio di Planning and Scheduling Technology (PST) dell'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione del CNR (CNR-ISTC), parte del Nodo DSU del CINI LAB AIIS. Si illustrano alcuni risultati ottenuti nell'ambito di progetti di ricerca nell'area dei sistemi di produzione e della robotica collaborativa. In particolar modo, si presenta l'applicazione di tecniche di Pianificazione Automatica e Scheduling in diversi progetti di ricerca svolti, e ancora in corso, nell'ambito del contesto industriale.

## 1 Introduzione

Il gruppo di ricerca del laboratorio di Planning and Scheduling Technology (PST) dell'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione del CNR è stato fondato nel 1997 come un gruppo di ricerca focalizzato su tecniche di Intelligenza Artificiale (IA) per la risoluzione di problemi di Planning and Scheduling (P&S). Il gruppo ha ottenuto importanti risultati nell'ambito del constraint reasoning, (meta) heuristics for scheduling, mixed-initiative problem solving, timeline-based planning. Negli ultimi dieci anni, il gruppo ha allargato i suoi interessi di ricerca verso nuove aree acquisendo importanti competenze in particolar modo nel contesto del manifatturiero lavorando in progetti nazionali e internazionali. Questo abstract descrive sinteticamente i risultati ottenuti nell'ambito dei sistemi di produzione avanzati (flessibili e riconfigurabili) e della robotica collaborativa. Il gruppo infatti lavora allo sviluppo di soluzioni innovative per il controllo di sistemi industriali (meccatronici e robotici).

## 2 Robotica Collaborativa Flessibile e Sicura

Durante l'ultimo decennio, i sistemi robotici industriali sono entrati nelle celle di assemblaggio supportando i lavoratori umani in operazioni ripetitive e fisicamente impegnative. La presenza contemporanea di robot ed operatori umani in ambienti condivisi comporta molti problemi da affrontare in modo appropriato, che richiedono sistemi di controllo robusti in grado di mantenere alti livelli di produttività e allo stesso tempo rispettare la sicurezza degli operai [Freitag e Hildebrandt, 2016]. Gli scenari di Human-Robot Collaboration

(HRC) comportano sfide per l'interazione fisica, per garantire sempre la sicurezza degli operatori umani, e il coordinamento delle attività, per migliorare la produttività delle celle collaborative. Pertanto, l'implementazione di controller altamente flessibili e adattivi in grado di preservare la produttività e al tempo stesso rafforzare la sicurezza umana è un requisito fondamentale.

Le tecniche di Intelligenza Artificiale possono portare soluzioni efficaci per affrontare tali sfide. Per esempio, sistemi dinamici di pianificazione delle attività basati su soluzioni flessibili possono essere una Key Enabling Technology per i controller HRC in cui i movimenti dei robot devono essere continuamente adattati alla presenza degli esseri umani che agiscono come "agenti" incontrollabili nell'ambiente. La loro presenza richiede la capacità per i sistemi di controllo di valutare la variabilità dei tempi di esecuzione del robot e, in questo senso, i metodi di controllo standard non sono del tutto efficaci. Inoltre, l'integrazione della tecnologia Planning and Scheduling (P&S) con le soluzioni di Knowledge Engineering e, più specificamente, con le tecniche di Verifica e Validazione (V&V) è un elemento chiave per sintetizzare i sistemi safety-critical nella robotica [Orlandini *et al.*, 2014]. Infatti, l'implementazione di soluzioni basate sulla pianificazione richiede che esperti del settore (ad esempio ingegneri di produzione), ingegneri della conoscenza e robotici interagiscano in modo molto stretto col fine di progettare modelli adatti di celle robotiche che tengano conto sia dei requisiti operativi che di safety [La Viola *et al.*, 2019]. Per questo la capacità di supportare processi di Knowledge Engineering per integrare il controllo di alto e basso livello (anche da parte di utenti non specializzati) può facilitare l'implementazione di soluzioni efficaci e sicure (safety) in diversi contesti industriali [Foderaro *et al.*, 2021].

Da oltre un decennio, il gruppo PST del ISTC-CNR ha avviato una iniziativa di ricerca per studiare la possibile integrazione di un framework di pianificazione basato su timeline (APSI [Cesta *et al.*, 2011]) e tecniche V&V basate su Timed Game Automata (TGA) per sintetizzare automaticamente un controller di robot che garantisce proprietà di robustezza e safety [Cesta *et al.*, 2009; Orlandini *et al.*, 2013]. In effetti, alcuni sistemi di controllo si basano su meccanismi di pianificazione temporale in grado di gestire attività coordinate con una certa flessibilità (incertezza) temporale (ad esempio, [Py *et al.*, 2010; Lemai e Ingrand, 2004]) che sfruttano

i pianificatori temporali (ad esempio, [Barreiro *et al.*, 2012; Ghallab e Laruelle, 1994]). Sfortunatamente, questi sistemi non consentono una rappresentazione esplicita delle caratteristiche di incontrollabilità. Di conseguenza, i controllori sviluppati con queste tecnologie non sono dotati della *robustezza* necessaria per far fronte all'incertezza temporale degli scenari HRC e ai conseguenti problemi di controllabilità [Morris e Muscettola, 2005]. Questi sistemi si basano solitamente su meccanismi di riprogrammazione che possono però penalizzare fortemente le performance di produzione. L'obiettivo di questa ricerca a lungo termine è quello di realizzare un solido sistema di pianificazione delle attività che consenta una HRC flessibile, sicura ed efficiente. In [Cesta *et al.*, 2016], è stato presentato un approccio generale perseguito in alcuni progetti di ricerca con l'obiettivo di realizzare controllori per robot collaborativi in grado di coordinare dinamicamente dei task di produzione in base al comportamento dei lavoratori umani.

Qui forniamo una brevissima panoramica dei risultati raccolti nell'ultimo decennio in merito allo sviluppo di un framework di pianificazione ed esecuzione delle attività (PLATINUm) [Umbrico *et al.*, 2017; Umbrico *et al.*, 2018] e la sua integrazione con una soluzione di Knowledge Engineering descrivendone l'implementazione in modo sicuro ed efficace soluzioni per la produzione di scenari HRC. PLATINUm è un sistema di pianificazione basato su una sequenza temporale in grado di supportare una pianificazione temporale flessibile e un'esecuzione con incertezza. Verranno inoltre presentati risultati più recenti sullo sviluppo di una tecnologia di pianificazione ed esecuzione delle attività impiegata in scenari di produzione realistici. In particolare, il documento presenta un ambiente di ingegneria e controllo che integra un sistema di pianificazione delle attività con un ambiente di ingegneria su misura per supportare una solida collaborazione uomo-robot. Inoltre, vengono fornite connessioni con ontologie e tecnologie semantiche per dimostrare come le astrazioni e il meta-ragionamento possono apportare ulteriori vantaggi in termini di adattabilità ed efficacia nell'affrontare l'incertezza [Borgo *et al.*, 2014; Borgo *et al.*, 2019; Umbrico *et al.*, 2020].

### 3 Promuovere l'autonomia tramite pianificazione ed esecuzione basate sulla sequenza temporale

La pianificazione automatica di problemi con vincoli temporali espliciti è un problema molto difficile in scenari reali. Tra i diversi approcci utilizzati dalla comunità scientifica, l'uso delle timeline flessibili in Planning and Scheduling (P&S) ha dimostrato di avere successo in una serie di applicazioni reali, come, ad esempio, nei sistemi per l'esplorazione spaziale autonoma [Cesta *et al.*, 2007; Jonsson *et al.*, 2000]. La pianificazione basata sulle timeline è stata introdotta da Muscettola [Muscettola, 1994], considerando un approccio modellistico ispirato alla teoria classica del controllo. Un problema di pianificazione viene modellato identificando un insieme di componenti rilevanti la cui evoluzione temporale deve essere controllata per ottenere un comportamento desiderato del sistema

generale. I componenti rappresentano dei sotto-sistemi logici o fisici il cui stato può variare nel tempo.

Il comportamento delle caratteristiche del dominio sotto controllo è modellato come un insieme di funzioni temporali i cui valori devono essere decisi su un orizzonte temporale (di solito finito e fissato). Tali funzioni vengono sintetizzate durante la risoluzione dei problemi generando un insieme di decisioni di pianificazione. L'evoluzione di una singola caratteristica temporale su un orizzonte temporale è chiamata timeline di quella caratteristica. In generale, i piani sintetizzati da sistemi di P&S temporali possono essere (i) temporalmente flessibili e (ii) non completamente controllabili. La flessibilità temporale si riflette sui piani di modellazione costituiti da timeline flessibili, che descrivono eventi di transizione associati a intervalli temporali (con durate i cui limiti inferiori e superiori sono dati), invece di occorrenze temporali istantanee. In altre parole, un piano temporale flessibile descrive un insieme (un "envelope") di possibili soluzioni con l'obiettivo di affrontare l'incertezza temporale durante la sua esecuzione concreta. Infatti, molte architetture di P&S generano piani flessibili che sono comunemente accettati come più robusti rispetto ai piani completamente specificati (tempi fissati in maniera categorica), quando devono far fronte all'esecuzione. In particolare, la seconda proprietà sopra citata è dovuta al fatto che non tutti i cambiamenti di stato in un piano sono sotto il controllo del sistema, in quanto esistono eventi esogeni fuori dal controllo del sistema (e.g., dipendono dall'ambiente esterno). L'esecuzione di un piano flessibile è solitamente sotto la responsabilità di un executive system che fissa i cambiamenti di valore sulle timeline inviando comandi al sistema controllato, ricevendo continuamente feedback sull'esecuzione e, quindi, monitorando l'esecuzione del piano stesso. In questi casi, il tempo di esecuzione delle attività controllabili dovrebbe essere scelto in modo che possano affrontare tutte le opzioni relative all'esecuzione degli eventi incontrollabili. Questo è noto in letteratura come problema di controllabilità [Vidal e Fargier, 1999].

Nato come successore di APSI, PLATINUm<sup>1</sup> è un framework software per la pianificazione ed esecuzione basato su timeline in grado di affrontare problemi di incertezza temporale e controllabilità conforme al formalizzazione data in [Cialdea Mayer *et al.*, 2016; Cialdea Mayer e Orlandini, 2015]. PLATINUm è in grado di affrontare dinamiche incontrollabili sia in fase di progettazione che di esecuzione. Il suo processo risolutivo persegue un approccio di raffinamento del piano che consiste nell'affinare iterativamente un piano soluzione parziale ragionando in termini di "flaw" che devono essere risolti. La selezione dei flaw è supportata da euristiche dedicate che guidano la procedura di pianificazione. Un pianificatore basato su PLATINUm si basa su un insieme di strutture dati e algoritmi chiamati rispettivamente componenti e risolutori. I componenti modellano i tipi di funzionalità che possono comporre un dominio di pianificazione. Specificano l'insieme di stati e vincoli che caratterizzano i comportamenti temporali di un particolare tipo di caratteristica del dominio. I resolver sono algoritmi dedicati che incapsulano la logica per costruire comportamenti temporali validi di un particola-

<sup>1</sup><https://github.com/pstlab/PLATINUm>

re componente. Il lettore può fare riferimento a [Umbrico *et al.*, 2017] per una descrizione più dettagliata del framework e dell'approccio risolutivo. Tuttavia, è importante sottolineare che i risolutori non sono responsabili delle decisioni durante il processo di ricerca. Sono responsabili del rilevamento dei difetti su un componente e del calcolo di tutte le possibili soluzioni di tali difetti al fine di garantire la completezza della ricerca. Ogni soluzione di un difetto rappresenta un ramo nella ricerca e spetta al pianificatore decidere quale difetto risolvere e quale soluzione applicare per l'espansione della ricerca (ad esempio, perfezionamento del piano). I tipi di difetti che un pianificatore basato su PLATINUM è in grado di affrontare dipendono dall'insieme di componenti e risolutori disponibili nel framework. PLATINUM fornisce componenti delle variabili di stato e relativi resolver che consentono a un pianificatore di costruire linee temporali valide secondo la semantica proposta in [Cialdea Mayer *et al.*, 2016]. Pertanto, PLATINUM è stato esteso con l'aggiunta di nuovi componenti e nuovi resolver per gestire adeguatamente le risorse [Umbrico *et al.*, 2018] e la pianificazione robusta tramite TGA [Lanzilli *et al.*, 2019].

PLATINUM è stato utilizzato anche per introdurre una innovativa metodologia integrata di pianificazione e sequenziamento di task e movimenti per robot collaborativi che (i) fornisce una serie di traiettorie del robot per ciascuna attività pianificata, nonché un intervallo sul tempo di esecuzione del robot per ciascuna traiettoria e (ii) ottimizza, in diverse fasi temporali, un piano di attività riducendo al minimo il tempo di ciclo attraverso una selezione ottimale della traiettoria, la sequenza di attività e l'allocazione (a operatore e robot) delle attività [Pellegrinelli *et al.*, 2017]. Più recentemente lo stesso strumento è stato utilizzato per combinare in modo efficiente la pianificazione delle attività e del movimento in HRC perseguendo un approccio basato su un controllo a due livelli, ovvero pianificazione delle attività e pianificazione dell'azione. Ciascun livello ragiona ad un diverso livello di astrazione: la pianificazione delle attività considera le operazioni di alto livello senza tener conto delle loro proprietà di movimento; la pianificazione dell'azione ottimizza l'esecuzione delle operazioni di alto livello in base allo stato dell'operatore umano e al ragionamento geometrico. Il risultato è una struttura di controllo gerarchica in cui il livello inferiore fornisce un feedback al livello superiore sulla fattibilità di ogni attività ed il livello superiore utilizza questo feedback per (ri)ottimizzare il piano del processo [Faroni *et al.*, 2020].

#### 4 Progetti di Ricerca e Prospettive Future

Le attività di ricerca descritte sopra rientrano nell'ambito di due progetti H2020 finanziati dalla Commissione Europea: FourByThree - [www.fourbythree.eu](http://www.fourbythree.eu) e ShareWork - [www.sharework-project.eu](http://www.sharework-project.eu). Questi progetti riguardano lo sviluppo di sistemi collaborativi e l'applicazione dei risultati rientra tra i temi inclusi nella cosiddetta Industria 4.0. Per questa sarà cruciale lo studio e lo sviluppo di modelli, tecnologie e applicazioni che favoriscano maggiore produttività, flessibilità, qualità della precisione con una adeguata attenzione agli aspetti legati alla sicurezza. L'utilizzo di tecniche di P&S integrate a tecnologie semantiche e di apprendimento

automatico costituisce un elemento fondamentale per continuare il processo di sviluppo dei sistemi di produzione avanzati del futuro. Il gruppo sta investigando l'integrazione di tecnologie per la rappresentazione della conoscenza e il ragionamento automatico con l'obiettivo di realizzare sistemi che sappiano adattare dinamicamente i propri comportamenti in base al contesto di produzione (es. diversi prodotti) o alle condizioni di collaborazione con operatori (es. più o meno esperti) [Borgo *et al.*, 2019].

#### Riferimenti bibliografici

- [Barreiro *et al.*, 2012] Javier Barreiro, Matthew Boyce, Minh Do, Jeremy Frank, Michael Iatauro, Tatiana Kichkaylo, Paul Morris, James Ong, Emilio Remolina, Tristan Smith, e David Smith. EUROPA: A Platform for AI Planning, Scheduling, Constraint Programming, and Optimization. In *ICKEPS 2012: the 4th Int. Competition on Knowledge Engineering for Planning and Scheduling*, 2012.
- [Borgo *et al.*, 2014] S. Borgo, A. Cesta, A. Orlandini, R. Rasconi, M. Suriano, e A. Umbrico. Towards a cooperative knowledge-based control architecture for a reconfigurable manufacturing plant. In *19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 2014.
- [Borgo *et al.*, 2019] Stefano Borgo, Amedeo Cesta, Andrea Orlandini, e Alessandro Umbrico. Knowledge-based Adaptive Agents for Manufacturing Domains. *Engineering with Computers*, 35(3):755–779, 2019.
- [Cesta *et al.*, 2007] A. Cesta, G. Cortellessa, S. Fratini, A. Oddi, e N. Policella. An innovative product for space mission planning – an *a posteriori* evaluation. In *Proc. of the 17th International Conference on Automated Planning & Scheduling (ICAPS-07)*, 2007.
- [Cesta *et al.*, 2009] A. Cesta, A. Finzi, S. Fratini, A. Orlandini, e E. Tronci. Flexible Timeline-Based Plan Verification. In *KI 2009: Advances in Artificial Intelligence*, volume 5803 of *LNAI*, 2009.
- [Cesta *et al.*, 2011] A. Cesta, G. Cortellessa, S. Fratini, e A. Oddi. MRSPOCK: Steps in Developing an End-to-End Space Application. *Computational Intelligence*, 27(1), 2011.
- [Cesta *et al.*, 2016] A. Cesta, A. Orlandini, G. Bernardi, e A. Umbrico. Towards a planning-based framework for symbiotic human-robot collaboration. In *21th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, 2016.
- [Cialdea Mayer *et al.*, 2016] Marta Cialdea Mayer, Andrea Orlandini, e Alessandro Umbrico. Planning and execution with flexible timelines: a formal account. *Acta Inf.*, 53(6-8):649–680, 2016.
- [Cialdea Mayer e Orlandini, 2015] Marta Cialdea Mayer e Andrea Orlandini. An executable semantics of flexible plans in terms of timed game automata. In *The 22nd International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME)*. IEEE, 2015.

- [Faroni *et al.*, 2020] Marco Faroni, Manuel Beschi, Stefano Ghidini, Nicola Pedrocchi, Alessandro Umbrico, Andrea Orlandini, e Amedeo Cesta. A layered control approach to human-aware task and motion planning for human-robot collaboration. In *IEEE Int. Conf. on Robot and Human Inter. Comm.*, Naples (Italy), 2020.
- [Foderaro *et al.*, 2021] Elisa Foderaro, Amedeo Cesta, Alessandro Umbrico, e Andrea Orlandini. Simplifying the a.i. planning modeling for human-robot collaboration. In *2021 30th IEEE International Conference on Robot Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 1011–1016, 2021.
- [Freitag e Hildebrandt, 2016] Michael Freitag e Torsten Hildebrandt. Automatic design of scheduling rules for complex manufacturing systems by multi-objective simulation-based optimization. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 65(1):433 – 436, 2016.
- [Ghallab e Laruelle, 1994] Malik Ghallab e Hervé Laruelle. Representation and control in ixtet, a temporal planner. In *2nd Int. Conf. on Artificial Intelligence Planning and Scheduling (AIPS)*, pages 61–67, 1994.
- [Jonsson *et al.*, 2000] A.K. Jonsson, P.H. Morris, N. Muscettola, K. Rajan, e B. Smith. Planning in Interplanetary Space: Theory and Practice. In *AIPS-00. Proceedings of the Fifth Int. Conf. on AI Planning and Scheduling*, 2000.
- [La Viola *et al.*, 2019] C. La Viola, A. Orlandini, A. Umbrico, e A. Cesta. Ros-tiplex: How to make experts in a.i. planning and robotics talk together and be happy. In *2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2019.
- [Lanzilli *et al.*, 2019] Annarita Lanzilli, Marta Cialdea Mayer, Amedeo Cesta, Andrea Orlandini, e Alessandro Umbrico. A prototype for the robust execution of flexible plans. In *Workshop on Artificial Intelligence and Formal Verification, Logic, Automata, and Synthesis (OVERLAY)*, 2019.
- [Lemai e Ingrand, 2004] S. Lemai e F. Ingrand. Interleaving Temporal Planning and Execution in Robotics Domains. In *AAAI-04*, pages 617–622, 2004.
- [Morris e Muscettola, 2005] Paul H. Morris e Nicola Muscettola. Temporal Dynamic Controllability Revisited. In *Proc. of AAAI 2005*, pages 1193–1198, 2005.
- [Muscettola, 1994] N. Muscettola. HSTS: Integrating Planning and Scheduling. In *Intelligent Scheduling*. Morgan Kaufmann, 1994.
- [Orlandini *et al.*, 2013] A. Orlandini, M. Suriano, A. Cesta, e A. Finzi. Controller synthesis for safety critical planning. In *IEEE 25th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013)*, pages 306–313. IEEE, 2013.
- [Orlandini *et al.*, 2014] Andrea Orlandini, Giulio Bernardi, Amedeo Cesta, e Alberto Finzi. Planning meets verification and validation in a knowledge engineering environment. *Intelligenza Artificiale*, 8(1):87–100, 2014.
- [Pellegrinelli *et al.*, 2017] Stefania Pellegrinelli, Andrea Orlandini, Nicola Pedrocchi, Alessandro Umbrico, e Tullio Tolio. Motion planning and scheduling for human and industrial-robot collaboration. *CIRP Annals*, 66(1):1 – 4, 2017.
- [Py *et al.*, 2010] Frederic Py, Kanna Rajan, e Conor McGann. A systematic agent framework for situated autonomous systems. In *AAMAS*, pages 583–590, 2010.
- [Umbrico *et al.*, 2017] Alessandro Umbrico, Amedeo Cesta, Marta Cialdea Mayer, e Andrea Orlandini. Platinum: A new framework for planning and acting. In *AI\*IA 2017 Advances in Artificial Intelligence*, pages 498–512, 2017.
- [Umbrico *et al.*, 2018] Alessandro Umbrico, Amedeo Cesta, Marta Cialdea Mayer, e Andrea Orlandini. Integrating resource management and timeline-based planning. In *Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018)*, pages 264–272, 2018.
- [Umbrico *et al.*, 2020] Alessandro Umbrico, Andrea Orlandini, e Amedeo Cesta. An ontology for human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 93:1097–1102, 2020. 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020.
- [Vidal e Fargier, 1999] Thierry Vidal e Hélène Fargier. Handling Contingency in Temporal Constraint Networks: From Consistency To Controllabilities. *JETAI*, 11(1), 1999.