الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
The People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
The Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة العليا للإعلام الآلي - 8 ماي 1945 - سيدي بلعباس
The Higher School of Computer Science -08 May 1945- Sidi Bel Abbes

GRADUATION THESIS

To obtain the diploma of **Engineering**
Field: **Computer Science**
Specialty: **Artificial Intelligence And Data Science**

Theme

Development of a Multi-objective Optimization Algorithm for Interpretable Rule Induction in Multi-label Classification

---

Presented By
Adel Abdelkader MOKADEM

Defended on September 24^{th}, 2025 In front of the jury composed of

Dr. Bachir Nadir MAHAMMED	President
Dr. Nassima DIF	Supervisor
Pr. Sidi Mohammed BENSLIMANE	Co-supervisor
Pr. Marie-Eléonore KESSACI	Co-supervisor
Dr. Julie JACQUES	Co-supervisor
Dr. Samiha MEZRAR	Examinator

Academic year : 2024/2025

Abstract

Multi-label classification (MLC) has emerged as one of the most compelling and challenging paradigms in machine learning, reflecting the inherently complex nature of real-world data where instances naturally belong to multiple labels simultaneously. While this paradigm offers a richer representation of complex data, it also introduces significant challenges, including correlations between labels, high dimensionality, severe class imbalance, and the exponential growth of possible label combinations. These challenges have led researchers to reconceptualize multi-label classification as a combinatorial optimization problem, motivating the use of multi-objective optimization and metaheuristic approaches, which can efficiently navigate large search spaces and generate diverse sets of high-quality trade-off solutions. However, despite these advances, a persistent limitation lies in the lack of explainability, as most optimization-driven methods prioritize predictive performance while offering little interpretability. In this work, we introduce MOEA/D-AM, a novel multi-objective evolutionary algorithm that addresses this critical gap by integrating rule-based mechanisms within the decomposition-based MOEA/D framework. The proposed algorithm optimizes multiple conflicting objectives while generating human-readable decision rules that provide clear insights into the classification process for both single-label and multi-label scenarios. Through comprehensive experimental evaluation on benchmark datasets, we demonstrate that our algorithm achieves competitive predictive performance while providing the explainability needed for deployment in domains where understanding the reasoning behind decisions is crucial.

Keywords **:** Multi-label Classification, Combinatorial Optimization, Multi-objective Optimization, Metaheuristics, Evolutionary Algorithms, Ant Colony Optimization.

Résumé

La classification multi-label (MLC) est devenue l'un des paradigmes les plus captivants et difficiles de l'apprentissage automatique, reflétant la nature intrinsèquement complexe des données du monde réel où les instances appartiennent naturellement à plusieurs labels simultanément. Bien que ce paradigme offre une représentation plus riche des données complexes, il introduit également des défis considérables, notamment les corrélations entre labels, la haute dimensionnalité, le déséquilibre sévère des classes, et la croissance exponentielle des combinaisons possibles de labels. Ces défis ont amené les chercheurs à reconceptualiser la classification multi-étiquettes comme un problème d'optimisation combinatoire, motivant l'utilisation d'approches d'optimisation multi-objectifs et métaheuristiques, qui peuvent naviguer efficacement dans de vastes espaces de recherche et générer des ensembles diversifiés de solutions de compromis de haute qualité. Cependant, malgré ces avancées, une limitation persistante réside dans le manque d'explicabilité, car la plupart des méthodes basées sur l'optimisation privilégient les performances prédictives tout en offrant peu d'interprétabilité. Dans ce travail, nous introduisons MOEA/D-AM, un nouvel algorithme évolutionnaire multi-objectifs qui aborde cette lacune critique en intégrant des mécanismes basés sur les règles dans le cadre de la décomposition MOEA/D. L'algorithme proposé optimise plusieurs objectifs conflictuels tout en générant des règles de décision lisibles par l'homme qui fournissent des perspectives claires sur le processus de classification pour les scénarios de classification mono-label et multi-label. Grâce à une évaluation expérimentale approfondie sur des jeux de données de référence, nous démontrons que notre algorithme atteint des performances prédictives compétitives tout en fournissant l'explicabilité nécessaire pour le déploiement dans des domaines où la compréhension du raisonnement derrière les décisions est cruciale.

Mots-clés : Classification multi-label, Optimisation combinatoire, Optimisation multi-objectif, Métaheuristiques, Algorithmes évolutionnaires, Optimisation par colonie de fourmis.

ملخص

يُعدّ التصنيف متعدد العلامات كأحد أكثر النماذج إلحاحًا وتحديًا في مجال التعلم الآلي، إذ يعكس الطبيعة المعقدة بطبيعتها للبيانات الواقعية، حيث تنتمي الحالات إلى علامات متعددة في آن واحد. وبينما يُقدم هذا النموذج تمثيلًا غنيًا للبيانات المعقدة، فإنه يطرح أيضًا تحديات كبيرة، بما في ذلك الارتباطات بين العلامات، وارتفاع أبعادها، واختلال التوازن الحاد بين الفئات، والنمو الهائل لمجموعات العلامات المحتملة. وقد دفعت هذه التحديات الباحثين إلى إعادة صياغة التصنيف متعدد العلامات كمشكلة تحسين توافقي، مما حفز استخدام التحسين متعدد الأهداف و تقنيات الارشاد العام، القادرة على التنقل بكفاءة في مساحات بحث واسعة وتوليد مجموعات متنوعة من حلول الموازنة عالية الجودة. ومع ذلك، وعلى الرغم من هذه التطورات، يكمن أحد القيود المستمرة في عدم القدرة على التفسير، حيث تُعطي معظم الطرق القائمة على التحسين الأولوية للأداء التنبئي مع توفير قدر ضئيل من قابلية التفسير. في هذا العمل، نُقدّم پويا خوارزمية تطورية جديدة متعددة الأهداف، تُعالج هذه الفجوة الحرجة من خلال دمج آليات قائمة على القواعد ضمن إطار پويا القائم على التقسيم. تُحسّن الخوارزمية المقترحة الأهداف المتعاكسة المتعددة، مع توليد قواعد قرار سهلة القراءة، تُوفر رؤى واضحة لعملية التصنيف في سيناريوهات التصنيف الأحادي والمتعدد. من خلال تقييم تجريبي شامل لمجموعات بيانات معيارية، نُبيّن أن خوارزميتنا تُحقق أداءً تنبؤيًا تنافسيًا، مع توفيرها القدرة على التفسير اللازمة للنشر في المجالات التي يكون فيها فهم أسباب القرارات أمرًا بالغ الأهمية.

الكلمات المفتاحية: التصنيف متعدد العلامات، التحسين التوافقي، التحسين متعدد الأهداف، الارشاد العام، الخوارزميات التطورية، خوارزمية مستعمرة النمل