

22

CIENCIAS
EXPERIMENTALES Y
TECNOLOGÍA

 Servicio
de
Publicaciones

Abraham Duarte Muñoz
Juan José Pantrigo Fernández
Micael Gallego Carrillo

METAHEURÍSTICAS

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Una gran cantidad de problemas que tienen interés en ciencia y tecnología pueden enunciarse como problemas de optimización. Existe una colección importante de problemas de optimización para la que no se dispone de algoritmos exactos que permitan encontrar la solución óptima en tiempos de cómputo que se puedan asumir. Para resolver estos problemas, una alternativa consiste en diseñar algoritmos aproximados que encuentren soluciones de alta calidad en tiempos razonables. De entre todos los métodos aproximados destacan las metaheurísticas por su eficiencia, efectividad y flexibilidad. Estos métodos se han aplicado con éxito a una gran variedad de problemas de optimización.

La presente obra tiene como objetivo recoger una visión resumida, aunque completa, del estado de la cuestión en el ámbito de las metaheurísticas. En ella, se ha prestado especial atención a la presentación didáctica de los contenidos, de forma que sean entendibles para lectores de formación científico-técnica con conocimientos básicos de algoritmia y programación. Por lo tanto, este libro está dirigido tanto a aquéllos que cursan estudios de postgrado como a los que necesitan resolver problemas de optimización en el ejercicio de su profesión.



Optima C.A.

Metaheurísticas

1. The first part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the Board of Directors of the Corporation.

Abraham Duarte Muñoz
Juan José Pantrigo Fernández
Micael Gallego Carrillo

Metaheurísticas

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistemas de recuperación, sin permiso escrito del AUTOR y de la Editorial DYKINSON, S.L.

© Copyright by
Universidad Rey Juan Carlos
Servicio de Publicaciones
Los Autores
Madrid, 2007

Editorial DYKINSON, S.L. Meléndez Valdés, 61 - 28015 Madrid
Teléfono (+34) 91 544 28 46 - (+34) 91 544 28 69
e-mail: info@dykinson.com
<http://www.dykinson.es>
<http://www.dykinson.com>

ISBN: 978-84-9849-016-9
Depósito Legal: SE-2058-2007 Unión Europea

Preimpresión realizada por los autores

Impreso por: Publidisa

A María I. El problema de optimización más entretenido que me he encontrado.

Abraham Duarte

A mis padres y a mis hermanos. Sois maravillosos.

A Nora, que siempre me muestra ese otro punto de vista tan sugerente.

Juan J. Pantrigo

A Ana, por estar a mi lado.

A mi familia, por haberme apoyado siempre.

A mis compañeros del grupo Gavab de la URJC, por dejarme compartir mis inquietudes con ellos.

Micael Gallego

NO TE DETENGAS

“No dejes que termine el día sin haber crecido un poco, sin haber sido feliz, sin haber aumentado tus sueños. No te dejes vencer por el desaliento. No permitas que nadie te quite el derecho a expresarte, que es casi un deber. No abandones las ansias de hacer de tu vida algo extraordinario. No dejes de creer que las palabras y las poesías sí pueden cambiar el mundo. Pase lo que pase nuestra esencia está intacta. Somos seres llenos de pasión. La vida es desierto y oasis. Nos derriba, nos lastima, nos enseña, nos convierte en protagonistas de nuestra propia historia. Aunque el viento sople en contra, la poderosa obra continúa: tú puedes aportar una estrofa. No dejes nunca de soñar, porque en sueños es libre el hombre.”

Anónimo (atribuido a Walt Whitman)

Índice de algoritmos

5.1. Búsqueda Tabú	48
5.2. Recocido Simulado	55
5.3. Búsqueda en Vecindad Variable	59
5.4. Búsqueda Local Guiada	65
5.5. FANS	70
5.6. Iterated Local Search	75
6.1. Algoritmo Evolutivo	81
6.2. Algoritmo Memético	84
6.3. Optimizador Local	86
6.4. Búsqueda Dispersa	89
6.5. Reencadenamiento de Trayectorias	92
6.6. Algoritmos de Estimación de la Distribución	96
6.7. Algoritmo Cultural	99
6.8. Optimización por enjambre de partículas	102
7.1. Multi-Start Methods	106
7.2. GRASP	108
7.3. Fase constructiva de GRASP	110
7.4. Fase de mejora de GRASP	112
7.5. Optimización por Colonias de Hormigas	116
7.6. POPMUSIC	118
9.1. Función hash	155
10.1. Búsqueda Dispersa Mejorada	160
10.2. Mejora de soluciones y actualización del <i>RefSet</i>	161
A.1. NombreAlgoritmo	184

4. Algoritmos Metaheurísticos	31
4.1. Introducción	31
4.2. Clasificación de algoritmos metaheurísticos	35
4.2.1. Taxonomías clásicas	35
4.2.2. Taxonomía tabular	36
4.2.3. Taxonomía jerárquica	39
4.2.4. Taxonomía basada en la relación intensificación-diversificación	42
4.3. Limitaciones de los algoritmos metaheurísticos	44
5. Metaheurísticas Trayectoriales	45
5.1. Introducción	45
5.2. Búsqueda tabú	46
5.3. Recocido simulado	51
5.4. Búsqueda de vecindad variable	57
5.5. Búsqueda local guiada	61
5.6. Aceptación de umbral	64
5.7. Métodos ruidosos	67
5.8. FANS	68
5.9. Búsqueda local iterativa	72
6. Metaheurísticas Poblacionales	79
6.1. Introducción	79
6.2. Algoritmos evolutivos	79
6.2.1. Algoritmos genéticos	82
6.2.2. Algoritmos meméticos	84
6.3. Búsqueda dispersa	86
6.4. Reencadenamiento de trayectorias	91
6.5. Algoritmos de estimación de la distribución	95
6.6. Algoritmos culturales	97
6.7. Inteligencia de enjambre y opt. por enjambre de partículas	101
7. Metaheurísticas Constructivas	105
7.1. Introducción	105
7.2. Métodos multi-arranque	105
7.3. GRASP	107
7.4. Concentración heurística	113
7.5. Optimización por colonias de hormigas	114
7.6. POPMUSIC	117
7.7. Equipos asíncronos	120

ÍNDICE GENERAL

XI

8. Tendencias Actuales en Optimización Metaheurística	125
8.1. Introducción	125
8.2. Técnicas híbridas	125
8.3. Hiperheurísticas	128
8.4. Implementaciones avanzadas	129
8.4.1. Análisis del espacio de búsqueda	130
8.4.2. Búsquedas multi-objetivo	131
8.4.3. Implementaciones paralelas	132
8.5. Optimización dinámica	133
8.5.1. Algoritmos evolutivos	135
8.5.2. Optimización por colonias de hormigas	139
8.5.3. Algoritmos culturales	140
8.5.4. Inteligencia de enjambre	141
8.5.5. Filtro de partículas metaheurístico	143
9. Búsqueda dispersa aplicada al MDP	145
9.1. Introducción	145
9.2. Ejemplo detallado	146
9.3. Aplicación de la búsqueda dispersa	148
9.3.1. Distancia entre soluciones	149
9.3.2. Métodos de generación de soluciones diversas	150
9.3.3. Método de generación de subconjuntos	151
9.3.4. Métodos de combinación	151
9.3.5. Métodos de mejora	153
9.3.6. Filtro en el método de mejora	154
10. Cuestiones de implementación	157
10.1. Introducción	157
10.2. Diseño	157
10.3. Detalles de implementación	162
10.3.1. Algoritmo ScatterSearch	162
10.3.2. Algoritmo de diversificación	168
10.3.3. Generación de soluciones diversas. Selección aleatoria	171
10.3.4. Método de combinación. Selección D-2	173
10.3.5. Método de Mejora. Búsqueda Local Mejorada	177
A. Especificación de la Sintaxis del Lenguaje Algorítmico	181
A.1. Tipos de datos básicos	181
A.1.1. <i>Integer</i>	181
A.1.2. <i>Real</i>	182
A.1.3. <i>Char</i>	182
A.1.4. <i>Boolean</i>	183

A.1.5. Operadores de relación	183
A.2. Comentarios	183
A.3. Estructura de un algoritmo	184
A.3.1. Cabecera	184
A.3.2. Declaración de variables	185
A.3.3. Cuerpo del algoritmo	185
A.4. Instrucciones	185
A.4.1. Instrucción de asignación	185
A.4.2. Instrucciones en lenguaje natural	185
A.4.3. Estructuras de selección	185
A.4.4. Estructuras de repetición	186
A.4.5. Llamadas a otros algoritmos	187
A.5. Tipos de datos derivados	187
A.5.1. Arrays	187
A.5.2. Registros	188
A.5.3. Listas	189
B. Definición de Tipos de Datos	191
B.1. TipoComponente	191
B.2. TipoSolucion	191
B.3. TipoOperador	191
B.4. TipoFuncionObjetivo	192
C. Tabla de acrónimos	193
Bibliografía	195

Índice de figuras

1.1. Espacio de búsqueda y su subespacio de soluciones factibles.	5
1.2. Vecindad de una solución x marcado por el área interior a la circunferencia.	6
1.3. Función objetivo con máximo global, máximo local y vecindad.	8
1.4. Relación entre los problemas \mathcal{P} y \mathcal{NP}	9
1.5. Relación entre los problemas \mathcal{P} , \mathcal{NP} y $\mathcal{NP} - \text{completo}$	10
1.6. Relación entre los problemas \mathcal{P} , \mathcal{NP} , $\mathcal{NP} - \text{completo}$ y $\mathcal{NP} - \text{duro}$	11
2.1. Problema del viajante en un grafo G . Las líneas gruesas representan un circuito hamiltoniano, es decir, una posible solución al problema dada por la permutación $[v_1, v_2, v_9, v_6, v_8, v_5, v_4, v_7, v_3]$	16
2.2. Problema del enrutamiento de vehículos en un grafo G . Las líneas gruesas representan una posible solución al problema dada por las rutas $m_1 = [v_0, v_2, v_3, v_1, v_0]$, $m_2 = [v_0, v_4, v_7, v_5, v_0]$ y $m_3 = [v_0, v_6, v_8, v_9, v_0]$	18
2.3. Grupo de corte para un grafo G	20
2.4. El problema de la selección de los tres elementos más diversos entre un conjunto de nueve localizados en el plano euclídeo. Los elementos seleccionados aparecen sombreados. En este caso, la solución viene determinada por la expresión: $[1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1]$	22
3.1. Función multimodal. Suele conducir a que los algoritmos heurísticos queden atrapados en óptimos locales.	29
4.1. Elementos básicos que permiten el diseño de metaheurísticas.	33
4.2. Resumen de las características que presentan las distintas metaheurísticas.	37
4.3. Estructura de árbol que permite la clasificación jerárquica de las metaheurísticas.	40
4.4. Vista algorítmica unificada de las metaheurísticas.	41
4.5. Espacio intensificación-diversificación.	42

5.1. Convergencia a mínimos absolutos. (a) Enfoque multi-arranque. (b) Enfoque aleatorizado. (c) Enfoque determinista y sistemático. . . .	45
5.2. Procedimiento de búsqueda a través de TS.	47
5.3. (a) Ejemplo de diferentes distribuciones de partículas en niveles de energía en función de la temperatura. (b) Probabilidad de aceptación en función de la temperatura.	53
5.4. Perfil del espacio de búsqueda para dos estructuras de vecindad distintas.	57
5.5. Escape de un óptimo local a través de la penalización de la función objetivo.	62
5.6. Ejemplos de etiquetas borrosas.	69
5.7. (a) Topología del espacio de búsqueda SS para una función objetivo y una vecindad dada. (b) Topología del espacio de búsqueda remuestreado SS^*	74
5.8. Perturbaciones en la solución para encontrar el cuenco de atracción vecino.	75
6.1. Poblaciones (a) inicial y (b) final durante un proceso de optimización utilizando una metaheurística poblacional. Generalmente, el espacio de búsqueda es multidimensional.	80
6.2. Representación gráfica de las etapas de la búsqueda dispersa (adaptado de [198]).	87
6.3. Esquema general para un algoritmo cultural.	100
7.1. Lista de candidatos restringida para problemas de maximización. . .	109
7.2. Caminos del hormiguero a la comida.	115
7.3. Ejemplo de dos clases muy poco relacionadas con el resto (parte de arriba) y un sub-problema creado a partir de la semilla s_3 y 5 clases muy relacionadas (resaltadas en gris oscuro alrededor de la semilla).	120
7.4. AT para resolver el problema del TSP.	121
8.1. Clasificación jerárquica de las metaheurísticas híbridas (adaptado de [306]).	126
8.2. Clasificación plana de las metaheurísticas híbridas (adaptado de [306]).	127
8.3. Esquema general para una hiper-heurística.	129
10.1. Diagrama de clases de la metaheurística Scatter Search aplicada al MDP.	158

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de algoritmos	XV
Prólogo	XVII
1. Introducción a la Optimización	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Heurísticas	2
1.1.2. Metaheurísticas	3
1.2. Definiciones	4
1.2.1. Vecindad y óptimos locales	6
1.2.2. Intensificación y diversificación	8
1.3. Complejidad algorítmica: problemas \mathcal{P} y \mathcal{NP}	9
1.4. Limitaciones de los algoritmos exactos	13
2. Problemas Clásicos de Optimización	15
2.1. Introducción	15
2.2. El problema del viajante de comercio	15
2.3. El problema del enrutamiento de vehículos	17
2.4. El problema de la mochila	19
2.5. El problema del corte máximo sobre grafos	19
2.6. El problema de la máxima diversidad	21
2.7. El problema de la ordenación lineal	22
3. Algoritmos Heurísticos	25
3.1. Introducción	25
3.2. Definiciones de algoritmos heurísticos	25
3.3. Clasificación de algoritmos heurísticos	27
3.4. Limitaciones de los algoritmos heurísticos	28

Prólogo

Una gran cantidad de problemas que tienen interés en multitud de campos científicos y tecnológicos pueden enunciarse como problemas de optimización. La optimización constituye una disciplina fundamental en áreas como la Informática, la Inteligencia Artificial o la Investigación Operativa. Existe una colección importante de problemas de optimización para la que no se dispone de algoritmos exactos que permitan encontrar la solución óptima en tiempos razonables. Para resolver estos problemas, una alternativa consiste en diseñar algoritmos aproximados que encuentren soluciones de alta calidad en un tiempo que pueda asumirse. De entre todos los métodos aproximados destacan las metaheurísticas por su eficiencia, efectividad y flexibilidad. Éstas se han aplicado con éxito a una gran variedad de problemas de optimización.

La presente obra tiene como objetivo recoger una visión resumida, aunque completa, del estado de la cuestión en el ámbito de las metaheurísticas. En ella, se ha prestado especial atención a la presentación didáctica de los contenidos, de forma que sean entendibles para todos los lectores que posean una formación científico-técnica y conocimientos básicos de algoritmia y programación. A ellos está dirigida esta obra, tanto a aquellos que cursan estudios de postgrado como a los que necesitan resolver problemas complejos de optimización en el ejercicio de su profesión. La obra se ha estructurado en diferentes capítulos que tratan temáticas diferentes alrededor de la optimización metaheurística, combinando contenidos teóricos y prácticos:

Capítulo 1: Introducción a la Optimización. En este capítulo se presentan conceptos fundamentales que serán necesarios para la lectura del resto del libro.

Capítulo 2: Problemas Clásicos de Optimización. En este capítulo se presenta una colección no exhaustiva de problemas clásicos de optimización. Los problemas que se presentan aquí han sido elegidos bien por su popularidad, bien porque los autores los hayan estudiado. La descripción es breve, de modo que no se incluye una revisión exhaustiva de los trabajos dedicados a su resolución.

Capítulo 3: Algoritmos heurísticos. Este capítulo introduce una visión general de los algoritmos heurísticos, describiéndolos y presentando su clasificación así como sus limitaciones.

Capítulo 4: Algoritmos metaheurísticos. En este capítulo se presenta una visión general de los algoritmos metaheurísticos, y al igual que en el capítulo anterior, se presta especial interés a su descripción, clasificación y limitaciones.

Capítulo 5: Metaheurísticas trayectoriales. Este es el primero de tres capítulos que se dedica a la descripción de metaheurísticas concretas. En cada uno de ellos, se revisa y describe de forma detallada las metaheurísticas aplicadas con éxito a una colección de problemas relativamente extensa. De cada una de ellas se señalan una serie de detalles, tales como el investigador que las propuso, principio básico de operación, descripción algorítmica de alto nivel, extensiones de la metaheurística y aplicaciones. Este capítulo se dedica a las metaheurísticas trayectoriales.

Capítulo 6: Metaheurísticas poblacionales. Este capítulo está dedicado al estudio de las metaheurísticas poblacionales y tiene la misma estructura que los anteriores.

Capítulo 7: Metaheurísticas constructivas. Este capítulo está dedicado al estudio de las metaheurísticas constructivas. Los contenidos se organizan de la misma forma que en el capítulo anterior.

Capítulo 8: Tendencias actuales. Se presenta aquí una revisión de las tendencias más actuales en optimización. Desde el punto de vista de los métodos, actualmente se tiende a abordar los problemas utilizando combinaciones de metaheurísticas e implementaciones avanzadas de las mismas. Desde el punto de vista de los nuevos problemas abordados, en esta obra se destaca el estudio de problemas de optimización dinámica.

Capítulo 9: Búsqueda dispersa aplicada al MDP. Se describe cómo aplicar una metaheurística a un problema determinado de optimización combinatoria. En concreto se detalla cómo utilizar una estrategia de Búsqueda Dispersa para resolver el problema de la Máxima Diversidad, describiendo cada uno de los bloques en los que se basa dicha metaheurística.

Capítulo 10: Cuestiones de implementación. En este capítulo se especifica los detalles de implementación en lenguaje Java del algoritmo descrito en el capítulo anterior. Dada su generalidad, varios de los aspectos de implementación descritos se podrían utilizar en el diseño de otros procedimientos metaheurísticos aplicados a otros problemas de optimización.

Este libro tiene sus orígenes en el desarrollo de un intenso y exhaustivo trabajo de revisión del estado del arte que los autores han desarrollado durante la preparación de sus tesis doctorales y se concreta después de una labor de síntesis de la información recopilada en el transcurso de este período. Estas tesis doctorales están dedicadas a la resolución de diferentes problemas de optimización y son las siguientes:

- Abraham Duarte presentó el 2 de julio de 2004 su Tesis Doctoral titulada “*Algoritmos Sociales Jerárquicos: Una metaheurística basada en la hibridación entre métodos constructivos y evolutivos*”, en la que se propone una nueva metaheurística que ha sido probada con éxito en diferentes problemas de optimización que se pueden modelar con una estructura de grafo.
- Juan José Pantrigo presentó el 27 de octubre de 2005 su Tesis Doctoral titulada “*Resolución de Problemas de Optimización Dinámica Mediante la Hibridación entre Filtros de Partículas y Metaheurísticas Poblacionales*” en la que se propuso un método de diseño de algoritmos especializados en la resolución de problemas de optimización dinámica.
- Micael Gallego se encuentra en el último año de preparación de su Tesis Doctoral, en la que se proponen y comparan diferentes métodos exactos y metaheurísticos para la resolución del problema de la máxima diversidad.

Esperamos que esta obra sea de utilidad a todos los lectores que la consulten y deseamos que despierte la curiosidad por el ámbito de la optimización metaheurística de todos aquellos que se acerquen a ella.

Los autores

