

Alexandre Rocha Duarte

**Novas heurísticas e uma
abordagem por programação
inteira para um problema de
correspondência inexata de
grafos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
Programa de Pós-graduação em
Informática**

Rio de Janeiro
Janeiro de 2004

Alexandre Rocha Duarte

**Novas heurísticas e uma abordagem por
programação inteira para um problema de
correspondência inexata de grafos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Informática do Departamento de Informática
da PUC-Rio

Orientador: Prof. Celso Carneiro Ribeiro

Rio de Janeiro
Janeiro de 2004



Alexandre Rocha Duarte

**Novas heurísticas e uma abordagem por
programação inteira para um problema de
correspondência inexata de grafos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Informática do Departamento de Informática
do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Celso Carneiro Ribeiro

Orientador
Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Maria Claudia Silva Boeres

UFES

Prof. Abilio Pereira de Lucena Filho

UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Janeiro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alexandre Rocha Duarte

Graduou-se em Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa-MG. Durante sua graduação, foi pesquisador do CNPq em trabalho de iniciação científica no departamento de administração da UFV. Durante o mestrado foi bolsista da CAPES, desenvolvendo um trabalho aplicado à área de correspondência inexata de grafos. Atualmente, trabalha com algoritmos exatos e aproximados para resolução de problemas NP-difíceis.

Ficha Catalográfica

Duarte, A. R.

Novas heurísticas e uma abordagem por programação inteira para um problema de correspondência inexata de grafos/ Alexandre Rocha Duarte; orientador: Celso Carneiro Ribeiro. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2004.

85 f. : il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Dissertações. 2. Otimização combinatoria. 3. Meta-heurísticas. 4. GRASP. 5. Busca local. 6. Correspondência inexata de grafos. 7. Programação inteira. 8. Modelagem por multi-fluxos. I. Ribeiro, C. C. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Aos meus amados pais.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Celso Carneiro Ribeiro por sua participação decisiva com a excelente orientação, dedicação, amizade e incentivo.

À professora Maria Claudia Boeres pela orientação no problema de aplicação deste trabalho e pela atenção e dedicação nas várias interações.

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado.

Aos colegas da pós-graduação do departamento de Informática da PUC-Rio, pela amizade que considero um dos mais importantes frutos deste trabalho. Em especial, agradeço ao Elbio pela grande ajuda na modelagem linear inteira do problema.

Aos amigos Francisco e Marcelo pelas inúmeras contribuições na realização desta pesquisa, pela paciência, compreensão e pela eterna amizade.

À Barbara pelo amor, carinho, apoio e compreensão pelos longos períodos em que estivemos distantes.

À minha família pelo carinho e apoio incondicional. Em especial aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado e dos quais me orgulho profundamente.

À Deus pela oportunidade de conhecer estas pessoas e participar deste trabalho.

Resumo

Duarte, A. R.; Ribeiro, C. C.. **Novas heurísticas e uma abordagem por programação inteira para um problema de correspondência inexata de grafos**. Rio de Janeiro, 2004. 85p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta novos algoritmos aproximados e uma abordagem exata para a resolução de um problema de correspondência inexata de grafos. O problema considerado é o de correspondência entre um grafo representando um modelo genérico e outro representando dados a serem reconhecidos. Assumi-se que o grafo dos dados possui mais vértices que o do modelo.

A motivação para o estudo desse problema vem de problemas de reconhecimento de cenas, que consistem na caracterização dos objetos envolvidos em uma determinada cena, assim como das relações existentes entre eles. Uma aplicação para este problema na área de reconhecimento de imagens médicas é a de efetuar-se o reconhecimento de estruturas 3D do cérebro humano, a partir de imagens obtidas por ressonância magnética. Tais imagens são previamente processadas por algum método de segmentação automática e o processo de reconhecimento consiste na busca da correspondência estrutural entre a imagem e um modelo genérico, tipicamente definido como um atlas de imagens médicas.

Foram propostos novos algoritmos aproximados, tais como um algoritmo construtivo guloso aleatorizado, um procedimento de reconexão de caminhos e um GRASP que combina estes com uma técnica de busca local. Além disso, foi proposta uma formulação original do problema como um problema de programação linear inteira, que permitiu a resolução de algumas instâncias de forma exata.

Palavras-chave

Otimização combinatória, Meta-heurísticas, GRASP, Busca local, Correspondência inexata de grafos, Programação inteira, Modelagem por multi-fluxos.

Abstract

Duarte, A. R.; Ribeiro, C. C.. **New Heuristics and an Integer Programming Approach to an Inexact Graph Matching Problem**. Rio de Janeiro, 2004. 85p. MSc. Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents new approximation algorithms and an exact approach to the solution of an inexact graph matching problem. The problem consists in finding the best match between a generic model graph and a graph representing an image, the latter with more nodes than the former.

The motivation for studying this problem comes from a scene recognition problem, which consists in characterizing objects involved in a given scene and the relationships between them. An application of this problem appears in the analysis of medical images and consists in recognizing 3-dimensional structures in the human brain using images obtained by magnetic resonance. Such images must be previously processed by an automatic segmentation method and the recognition process consists in the search of an structural matching between the image and a generic model, typically defined as an atlas of medical images.

New heuristics are proposed, such as a greedy randomized construction algorithm, a path relinking procedure and a GRASP heuristic that combines them with a local search technique. Furthermore, an original integer formulation of the problem based on integer multicommodity flows is proposed, which makes possible the exact solution of medium-sized instances.

Keywords

Combinatory optimization, Meta-heuristics, GRASP, Inexact graph matching, Integer programming, Multicommodity flow model.

Conteúdo

1	Introdução	12
1.1	Objetivos do trabalho	14
1.2	Contribuições alcançadas	14
1.3	Estrutura da dissertação	15
2	Formulação do Problema	16
2.1	Reconhecimento de cenas por correspondência de grafos	16
2.2	Abordagens do problema de correspondência de grafos	18
2.3	Descrição e formulação do problema	19
2.4	Discussão	25
3	Modelagem por Programação Inteira	27
3.1	Linearização da contribuição de vértices	27
3.2	Corte de conexidade	29
3.3	Representação linear da restrição de conexidade	30
3.4	Formulação linear inteira	33
3.5	Discussão	33
4	Heurísticas	35
4.1	Métodos construtivos	36
4.1.1	Construtivo_1	36
4.1.2	Construtivo_2	38
4.1.3	Construtivo_2a	40
4.1.4	Construtivo_3	41
4.2	Métodos de busca local	42
4.2.1	Vizinhanças	44
4.2.2	Busca local na Vizinhança V_a	46
4.2.3	Busca local nas vizinhanças V_a e V_b	49
4.3	GRASP	52
4.3.1	GRASP com reconexão por caminhos	53
4.3.2	GRASP com reconexão por caminhos modificada	57
4.4	Discussão	59
5	Resultados	62
5.1	Problemas teste	62
5.2	Resolução do modelo de programação inteira	63
5.3	Métodos construtivos	65
5.4	GRASP	70
5.5	Discussão	73
6	Conclusões e Extensões	76
7	Bibliografia	79

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de imagem obtida por ressonância magnética e um modelo retirado de um atlas médico referentes a um corte do cérebro humano.	17
2.2	Exemplo de solução para o PCIG.	20
2.3	Correspondência mais adequada (Exemplo 1).	21
2.4	Correspondência mais adequada (Exemplo 2).	22
3.1	Exemplo de solução que viola a restrição de conectividade.	29
4.1	Duas soluções vizinhas para a vizinhança V_a	45
4.2	Duas soluções vizinhas para a vizinhança V_b	46
4.3	Exemplo de solução para uma instância pequena do PCIG.	49

Lista de Tabelas

2.1	S^v — Similaridades entre vértices de V_M e V_I para o Exemplo 1.	22
2.2	S^a — Similaridades entre arestas de E_M e E_I para o Exemplo 1.	22
2.3	S^v — Similaridades entre vértices de V_M e V_I para o Exemplo 2.	22
2.4	S^a — Similaridades entre arestas de E_M e E_I para o Exemplo 2.	23
5.1	Problemas teste.	63
5.2	Resultados da resolução do modelo de programação inteira. . .	64
5.3	Resultados dos métodos construtivos com $\alpha = 1,0$ para as instâncias I_0 a I_4	66
5.4	Resultados dos métodos construtivos com $\alpha = 1,0$ para as instâncias I_5 a I_9 , I_{5a} e I_{8a}	67
5.5	Resultados dos métodos construtivos com $\alpha = 0,5$ para as instâncias I_0 a I_4	68
5.6	Resultados dos métodos construtivos com $\alpha = 0,5$ para as instâncias I_5 a I_9 , I_{5a} e I_{8a}	69
5.7	Resultados dos algoritmos GRASP, utilizando o algoritmo Construtivo_2 com $\alpha = 1,0$	71
5.8	Resultados dos algoritmos GRASP, utilizando o algoritmo Construtivo_2 com $\alpha = 0,5$	72
5.9	Resultados do algoritmo GRASP com reconexão por caminhos modificada com $\alpha = 1,0$	73
5.10	Resultados do algoritmo GRASP com reconexão por caminhos modificada com $\alpha = 0,5$	74

Lista de Algoritmos

1	Algoritmo construtivo puramente aleatorizado.	37
2	Inicializações para cada tentativa de construção.	37
3	Cálculo das contribuições de vértices e arestas.	38
4	Algoritmo construtivo guloso aleatorizado.	39
5	Algoritmo construtivo guloso aleatorizado com lista de candidatos.	43
6	Busca local na vizinhança V_a	47
7	Busca local nas vizinhanças V_a e V_b	50
8	Cálculo do valor da troca de associações.	51
9	GRASP básico.	53
10	GRASP com reconexão por caminhos.	56
11	Procedimento de reconexão por caminhos.	58
12	Procedimento de cálculo dos valores de Δ	58
13	Procedimento de reconexão por caminhos modificado.	60