

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

*Enginyeria de Sistemes, Automàtica  
i Informàtica Industrial*

Programa de Doctorat

Control, Visió i Robòtica

---

**Color Constancy and Image  
Segmentation Techniques for  
Applications to Mobile Robotics**

---

Jaume Vergés–Llahí *Autor*

Alberto Sanfeliu *Director*

*Abril 2005*



# Resum

És aquesta una Tesi que pretén, per una banda, proporcionar un conjunt de tècniques per enfrontar-se al problema que suposa la variació del color en les imatges preses des d'una plataforma mòbil per causa del canvi en les condicions d'il·luminació entre diverses vistes d'una certa escena preses en diferents instants i posicions. Per altra banda, també es tracta el problema de la segmentació de imatges de color per a poder-les utilitzar en tasques associades a les capacitats d'un robot mòbil, com ara la identificació d'objectes o la recuperació d'imatges d'una gran base de dades. Aquestes tasques formarien part dels estrats més baixos d'altres com l'autolocalització per mitjà d'imatges o la cerca d'un objectiu preestablert en una escena.

Per tal de dur a terme aquests objectius, primerament es planteja el problema matemàtic d'establir de forma general la transformació entre colors degut a variacions de les condicions d'il·luminació. D'aquesta manera es proposa un model continu per la generació del senyal de color com a generalització natural que encabeix d'altres propostes anteriors àmpliament reconegudes com a particularitzacions seves. D'aquesta manera es pot estudiar amb completa generalitat i matemàticament les condicions per l'existència, unicitat i bon comportament numèric de les solucions, així com expressar genèricament qualsevol tipus d'aplicació entre colors, independentment de la discretització utilitzada més tard per aconseguir resultats numèrics. Així, queda palès la relació íntima entre el problema de la invariància de color i el de la recuperació espectral, que també es planteja a la pràctica. A més a més, el model desenvolupat es contrasta numèricament amb els resultats obtinguts mitjançant mètodes de regressió lineal, que determinen la millor transformació en termes d'aplicacions lineals i errors de predicció.

Un cop establert el model general per la variació de color i determinats els avantatges i desavantatges de cada esquema particular de discretització, s'opta per un model lineal simplificat a l'hora de realitzar els càlculs a la pràctica. Tot i que l'algorisme proposat no depèn d'aquest fet, la tria permet alleugerir el nombre de càlculs. En particular, el mètode proposat es basa en, donades dues imatges d'una escena, trobar la transformació més probable entre elles a partir del càlcul d'un conjunt de transformacions possibles i de l'estimació de la freqüència i grau d'efectivitat de cadascuna d'elles, mesurat com la distància entre els histogrames de color de la imatge canònica i la transformada. Posteriorment, es selecciona el millor candidat d'acord amb aquesta mesura de semblança mitjançant un conjunt de mètodes de selecció. L'aplicació resultant serveix per transformar els colors de la imatge tal i com es veuria sota les condicions d'il·luminació canòniques.

Una vegada s'aconsegueix que el color de les imatges corresponents a les

mateixes escenes sigui constant, cal procedir a la seva segmentació per extreure'n la informació corresponent a les regions amb color homogeni. En aquesta Tesi es suggereix un algorisme basat en la partició de l'arbre d'expansió mínima d'una imatge en les seves components mitjançant el càlcul d'una mesura local de la probabilitat que es produeixi o no una certa unió entre components. La idea és arribar a una segmentació coherent amb les regions reals que sigui un compromís entre particions amb moltes components (sobresegmentades) i d'altres amb molt poques components (subsegmentades).

Un altre objectiu és el d'obtenir un algorisme que sigui prou ràpid com perquè sigui útil en aplicacions de robòtica mòbil. Aquesta característica s'assoleix per mitjà d'un plantejament local i *greedy* del creixement de regions, tot i que les components resultants presentin també caràcters globals (color). Tanmateix, la tendència subsegmentadora d'aquesta aproximació es suavitza gràcies al factor probabilístic introduït semblant en essència al *simulated annealing*.

Un altre objectiu que l'algorisme de segmentació hauria de complir també és el de generar segmentacions estables en el temps, és a dir, que en segmentar imatges d'una mateixa seqüència, les regions generades haurien de mantenir-se a mesura que avança la seqüència. Per assolir aquest propòsit, l'algorisme referit abans s'ha ampliat incloent-hi un pas intermedi entre segmentacions que permet de relacionar regions semblants en imatges diferents i propagar cap endavant els reagrupaments de regions fets en anteriors imatges. La idea consisteix en què si un grup de regions en una certa imatge s'agrupa formant una sola regió més gran, les seves corresponents regions en la imatge subsegüent també s'han d'agrupar juntes. La correspondència es calcula amb la combinació de la distàncies entre els colors i les posicions de les regions dins de la imatge. D'aquesta manera s'aconsegueix que dues segmentacions correlatives s'assemblin, mantenir-ne estable la segmentació de tota la seqüència.

Finalment, en aquesta Tesi també es planteja el problema que apareix a l'hora de comparar imatges via les seves segmentacions. En cas de disposar d'una eina tal, es facilitaria la comparació d'imatges en base al seu contingut. Aquesta Tesi es concentra només en la informació de color i, a més de investigar quina és pels nostres interessos la millor mesura de distància entre segmentacions, es busca també mostrar com la invariància de color afecta les segmentacions, fent-les més semblants entre elles i reduint-ne, per tant, la seva distància mútua.

Els resultats obtinguts en cadascun dels objectius proposats en aquesta Tesi avalen els punts de vista defensats, i mostren la utilitat dels algorismes suggerits en aquestes pàgines, així com el model de formació de color tant per la recuperació espectral de funcions com pel càlcul explícit de les transformacions entre colors. L'algorisme d'invariància de color permet d'eliminar la variació del color d'un grup d'imatges pertanyents a una certa escena, mentre que l'algorisme de segmentació genera d'una manera ràpida segmentacions d'imatges de color prou bones com per reconèixer objectes o cercar-les en una base de dades, com es mostra. Ambdós algorismes es contrasten amb sengles mètodes àmpliament coneguts i corroborats per tal de comprovar els seus funcionaments i eficàcies.

Aquesta Tesi també conté dues revisions de l'estat de l'art en els temes de invariància de color i de segmentació d'imatges de color, així com un Apèndix on s'introdueixen les matemàtiques relatives a les equacions integrals de primera espècie, que són les que s'utilitzen a l'hora d'estudiar teòricament els problemes de recuperació espectral i de la transformació de colors.

# Abstract

This is a Thesis that endeavors, on the one hand, to provide a set of techniques to face the problem that supposes the color variation in images taken from a mobile platform and caused by the change in the conditions of illumination that appears among several views of a certain scene taken at different moments and positions. On the other hand, the problem of segmenting color images is also dealt in order to be used in a number of tasks associated with the capabilities of an autonomous robot, such as the identification of objects or the retrieval of images from a large database. These tasks would shape the lowest level of other abilities like self-location by means of images or the detection of a preestablished target in a scene.

In order to carry out these goals, the mathematical problem of establishing the transformation between colors in a general way due to a variation of the light conditions is firstly introduced. In this way, a continuous model for the generation of the color signal is proposed as a natural generalization encompassing several former well-established models, which become as a result mere particularizations of it. Consequently, conditions for the existence, uniqueness, and good numerical behavior of the solutions are studied in a completely general and mathematical manner, as well as expressing any type of color mapping independently of the discretization scheme used afterwards to achieve numerical results. Additionally, the intimate relation among the problems of color constancy and spectral recovery is made evident, being studied in the practical case too. Furthermore, the developed model is numerically confronted with the results obtained by a set of least squares fitting methods, which find the best linear transformation in terms of errors in predicting the color change.

Once the general model for the color change is established and the pros and cons of each particular discretization scheme are determined, by assuming some error, a simplified linear model is chosen in order to perform computations in practice. Even though the proposed color constancy algorithm does not depend on this fact, this choice allows for a relief on the computational burden. More precisely, the proposed method is based on finding, given two views of a scene, the likeliest mapping between them starting from the computation of a set of feasible mappings and the estimation of their frequencies and their degree of effectiveness, measured as the distance between the color histograms of the canonical image and the transformed one. Later, the best candidate in accordance to this likelihood measure is chosen through a set of methods of selection. The resulting map is then able to transform the colors of an image of the scene as it would be seen under the canonical lighting.

After keeping constant the colors of images belonging to the same scene, it is necessary to proceed to their segmentation so as to extract information

corresponding to regions exhibiting homogeneous colors. In this Thesis, a color image segmentation algorithm is suggested based on the partition of the minimum spanning tree of the image into its components by computing a local measure of the probability that estimates whether two components should be put together. The aim is to get a segmentation coherent with real regions, being at the same time a trade-off between partitions with many components (oversegmented) and those with fewer components (subsegmented).

Another goal is that of obtaining an algorithm fast enough to be useful in applications related with mobile robotics, where time constraints are important. This characteristic is attained by means of a local approach and a *greedy* region growth, despite the resulting components still show global features (color). However, the trend to produce too many components of this kind of approaches is softened thanks to the probabilistic framework introduced earlier, which is similar in essence to the *simulated annealing*.

Furthermore, the segmentation algorithm should also generate stable segmentations through time, that is, when segmenting consecutive images in a sequence, the produced regions should keep more or less similar as the sequence advances. In order to attain this purpose, the aforementioned algorithm has been widened including an intermediate step between segmentations which allows to relate similar regions in different images and to propagate forward the regrouping of regions made in previous images. If some of the regions in an image are joined together forming a bigger single region, the idea consists in putting their corresponding regions also together in the subsequent image. The correspondence is computed employing a combination of the distances between colors and positions of regions within the image. This way, it is achieved that two correlatives segmentations resemble each other, keeping the whole segmentation of a sequence stabler.

Finally, the problem that appears when comparing images via their segmentations is also studied in this Thesis. In case of having such a tool, comparing of images in regard to their content would be much easier. This Thesis focuses only on color information and, besides investigating which is for our aims the best distance between segmentations, it is also shown how a color constancy stage affects the aspect of image segmentations, that become more similar each other, being their mutual distance therefore reduced.

The results obtained in each of the goals proposed in this Thesis guarantee the exposed points of view, and show the utility of the algorithms suggested in these pages, as well as the suitability of the model of color formation for the spectral recovery of reflectance functions, as for the explicit computation of color mappings. The color constancy algorithm allows for the removal of color variation within a group of images belonging to a certain scene, while the segmentation algorithm produces in a fast way segmentations of color images good enough so as to perform object identification or image retrieval from a database, as it is shown. In addition, both algorithms are contrasted with other corresponding well-known and tested counterparts in order to check out their performance and efficiency.

This Thesis also contains two reviews on the state of the art of the issues of color constancy and color image segmentation, as well as an Appendix where some mathematics related to the integral equations of the first kind are introduced. These equations are used in the theoretical study of the problems of spectral recovery and color transformation.

# Agraïments

Sense ànims de semblar la llista de convidats a la boda extravagant d'un príncep ociós, voldria només esmentar en aquestes ratlles d'agraïments a les persones que, tant directament com indirecta, han tingut alguna influència beneficiosa en la realització d'aquesta tesi doctoral.

Primer de tot, voldria agrair a tots els contribuents la seva amable col·laboració en els meus estudis perquè, al cap davall, són ells qui mantenen amb els seus impostos l'ensenyament públic i les beques que he gaudit. En particular, per la beca predoctoral FI de la Generalitat de Catalunya, que m'ha permès de dur a terme aquesta treball. També, al Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya per la seva assistència durant el doctorat, així com per sufragar les còpies d'aquest document.

Voldria agrair també a l'Alberto per la confiança que m'ha fet durant aquests anys i l'oportunitat de poder participar en aquesta rara activitat, per escassa, com és la recerca. Cal fer esment, així mateix, dels altres companys amb els que he col·laborat, sense oblidar els projectes CICYT TAP98-0473 i CICYT DPI2001-2223, els fons dels quals han pagat els desplaçaments als congressos a què he tingut l'oportunitat d'assistir.

A més, voldria agrair a en Jan-Olof que em permetés d'estar dos cops al seu CVAP d'Estocolm, així com a la seva generositat per facilitar-me l'estança i poder viure uns mesos inoblidables en aquesta hiperbòria ciutat. L'experiència va molt més enllà de l'estrictament científic, i és el viure en un país que funciona el que realment compta. No oblidó tampoc els meus companys al CVAP, l'Eric, la Josephine, en Peter i l'Ivan, per les moltes vetllades enraonant entorn a unes pintes d'*öl*.

Més a la vora, agraeixo en Josep M<sup>a</sup>, la Cristina, en Jaume, la Carme i l'Agustí per les moltes bones estones que ja des de ben canalla hem compartit, abans a peu per la muntanya, i últimament més apaivagats per cataus tarragonins. I en José M<sup>a</sup>, amb qui m'he resseguit milers de quilòmetres llampant per carreteres inversemblants.

Finalment, i d'una manera molt sincera, vull expressar la més profunda gratitud a les dues persones a qui més dec, que són mons pares, en Jaume i na M<sup>a</sup> Rosa, a qui dedico aquesta tesi. Per tot el que sempre han fet i, en especial, durant aquests últims llargs anys de molts entrebancs. Per a què l'esforç hagi valgut la pena.

I a la resta de persones que llegeixin aquest treball, també els hi agraeixo a tots d'avançada el seu temps i espero que modestament aquesta tesi els ajudi en els seus propòsits.





# Acknowledgments

With no desire of seeming the list of invitations to the extravagant wedding of an idle prince, I would only like to mention in these lines the people who, either directly or indirectly, have given some beneficial influence on the accomplishment of this doctoral thesis.

First of all, I would like to thank all taxpayers for their kind contribution to my studies because, after all, they are the ones who maintain with their taxes the public education and the scholarships I have enjoyed. In particular, for the FI predoctoral scholarship of the Government of Catalonia, which allowed me to carry out this work. Also, the Department of Systems Engineering, Automatics, and Industrial Information Science at the Technical University of Catalonia for its assistance during the doctorate, and also for paying the copies of this document.

I would also like to thank Alberto for the confidence placed in me during these years and the opportunity of being able to participate in this rare activity, for its scarceness, that research is. It is likewise necessary to mention all other colleagues with whom I have collaborated, along with the CICYT TAP98-0473 and CICYT DPI2001-2223 projects, the funds of which paid the travels to the conferences where I had the chance to assist.

Furthermore, I would like to thank Jan-Olof, who allowed me to visit twice his CVAP in Stockholm, as well as his generosity to help me finding an accommodation where to live for some unforgettable months in this hyperborean city. The experience goes far beyond what is strictly scientific, and living in a country that works is what really counts. I do not forget, either, my fellows at CVAP, Eric, Josephine, Peter, and Ivan, for those many evenings of talking around some pints of *öl*.

Nearer, I thank Josep M<sup>a</sup>, Cristina, Jaume, Carme, and Agustí, for those many good whiles shared since childhood, time ago hiking through the mountains, and lately, in a more quiet way, around the watering places in Tarragona. And to José M<sup>a</sup>, with whom I have driven for thousands of kilometers at top speed along unbelievable roads.

Last but not least, I want to express sincerely my deepest gratitude to the two persons to whom I owe the most, which are my parents, Jaume and M<sup>a</sup> Rosa, to whom I dedicate this thesis. For all what they have always done and, specially, for these long years of many setbacks. For this well worth the effort.

And the rest of people who happens to read this work, I also thank you all in advance for your time and modestly hope this thesis can be of any help to your purposes.



*Aquesta tesi està dedicada  
als meus pares,  
en Jaume i na M<sup>a</sup> Rosa.*



*Se vuol ballare, Signor Contino,  
Il chitarrino le suonerò.*

*Se vuol venire nella mia scola,  
La capriola le insegnerò.*



# Contents

<b>1</b>	<b>Thesis Overview</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction . . . . .	1
1.2	Objectives . . . . .	4
1.2.1	Color Constancy . . . . .	4
1.2.2	Color Image Segmentation . . . . .	5
1.3	Outline of the Thesis . . . . .	5
1.4	Summary of the Thesis . . . . .	6
1.4.1	State-of-the-Art Survey on Color Const. Methods . . . . .	7
1.4.2	State-of-the-Art-Survey on Color Segm. Methods . . . . .	7
1.4.3	Continuous Color Formations Model . . . . .	8
1.4.4	A Color Constancy Algorithm . . . . .	9
1.4.5	A Color Image Segmentation Algorithm . . . . .	10
1.4.6	Comparing Images by Content . . . . .	11
1.5	Contributions of the Thesis . . . . .	12
1.6	List of Publications . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Survey on Color Constancy</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Outline of the Chapter . . . . .	16
2.3	Color Formation Model . . . . .	16
2.3.1	Reflection Model . . . . .	17
2.3.2	Sensor Model . . . . .	17
2.4	Hypotheses about the Physical World . . . . .	18
2.5	Color Constancy Methods . . . . .	19
2.5.1	Gray World Methods . . . . .	20
2.5.2	Retinex Methods . . . . .	20
2.5.3	Gamut-Mapping Methods . . . . .	21
2.5.4	Bayesian and Correlation Methods . . . . .	23
2.5.5	Neural Network Methods . . . . .	24
2.5.6	Multiple Views Methods . . . . .	24
2.5.7	Linear Models Methods . . . . .	25
2.6	Object Recognition and Image Indexing Methods . . . . .	27
2.7	Conclusions . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Survey on Color Segmentation</b>	<b>31</b>
3.1	Introduction . . . . .	31
3.2	Early Stages . . . . .	32
3.3	Middle Stages . . . . .	35

3.3.1	Pixel-Based Methods . . . . .	36
3.3.2	Area-Based Methods . . . . .	36
3.3.3	Contour-Based Methods . . . . .	37
3.3.4	Physics-Based Methods . . . . .	37
3.4	Recent Stages . . . . .	38
3.4.1	Feature-Based Methods . . . . .	39
3.4.2	Image-Based Methods . . . . .	42
3.4.3	Physics-Based Methods . . . . .	48
3.5	Conclusions . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Continuous Color Formation Model</b>	<b>53</b>
4.1	Introduction . . . . .	53
4.2	Outline of the Chapter . . . . .	54
4.3	Color Formation Model . . . . .	54
4.3.1	Reflection Model . . . . .	55
4.3.2	Sensor Model . . . . .	56
4.4	Continuous Color Formation Model . . . . .	57
4.5	Generalized Color Transformation . . . . .	59
4.6	Analytical Color Transformation . . . . .	60
4.7	Discrete Color Transformation . . . . .	63
4.8	IFK Relation with Former Color Models . . . . .	65
4.8.1	Bilinear Model . . . . .	65
4.8.2	Quadrature Model . . . . .	67
4.8.3	Diagonal Model . . . . .	68
4.9	Experiments and Results . . . . .	69
4.9.1	Data Description . . . . .	70
4.9.2	Fitting of Continuous Sensors . . . . .	71
4.9.3	Spectral Recovery of Reflectance Functions . . . . .	75
4.9.4	Color Mapping Computations . . . . .	82
4.10	Conclusions . . . . .	88
<b>5</b>	<b>A Color Constancy Algorithm</b>	<b>91</b>
5.1	Introduction . . . . .	91
5.2	Outline of the Chapter . . . . .	92
5.3	Related Previous Work . . . . .	93
5.3.1	Gamut-Mapping Algorithms . . . . .	93
5.3.2	Color-by-Correlation . . . . .	95
5.3.3	Color and Illuminant Voting . . . . .	97
5.4	Discussion . . . . .	99
5.5	The Color Constancy Algorithm . . . . .	100
5.5.1	Some Definitions . . . . .	100
5.5.2	Likelihood Function . . . . .	101
5.5.3	Color Coordinates . . . . .	102
5.5.4	Color Change Model . . . . .	103
5.5.5	Mapping Estimation . . . . .	103
5.5.6	Mapping Selection . . . . .	105
5.6	Experiments and Results . . . . .	105
5.6.1	Image Database Description . . . . .	105
5.6.2	Experiment Description . . . . .	106
5.6.3	Some Considerations about the Results . . . . .	113



5.7	Conclusions . . . . .	115
<b>6</b>	<b>A Color Segmentation Algorithm</b>	<b>117</b>
6.1	Introduction . . . . .	117
6.2	Outline of the Chapter . . . . .	119
6.3	Related Previous Work . . . . .	119
6.4	Segmentation of Color Images . . . . .	121
6.4.1	Some Definitions . . . . .	122
6.4.2	Algorithm Analysis . . . . .	123
6.4.3	Theoretical Approach . . . . .	124
6.4.4	Practical Approach . . . . .	126
6.4.5	Algorithm Sketch . . . . .	128
6.4.6	Color Spaces and Distances . . . . .	129
6.5	Segmentation of Sequences . . . . .	132
6.5.1	Computation of Component Correspondences . . . . .	132
6.5.2	Propagation of Component Correspondences . . . . .	133
6.6	Experiments and Results . . . . .	134
6.6.1	Segmentation of Static Images . . . . .	134
6.6.2	Segmentation of Sequences . . . . .	138
6.7	Conclusions . . . . .	143
<b>7</b>	<b>Comparing Images by Content</b>	<b>145</b>
7.1	Introduction . . . . .	145
7.2	Outline of the Chapter . . . . .	146
7.3	Related Work . . . . .	146
7.3.1	Histogram Signature . . . . .	147
7.3.2	Color Layout Signature . . . . .	147
7.3.3	Region-based Signature . . . . .	148
7.4	Types of Region Signatures . . . . .	150
7.5	Multivariate Gaussian Distributions . . . . .	152
7.6	Distances between Image Regions . . . . .	152
7.6.1	Euclidean Distance . . . . .	153
7.6.2	Mahalanobis Distance . . . . .	153
7.6.3	Fréchet Distance . . . . .	154
7.6.4	Hotelling's $T^2$ Test . . . . .	154
7.6.5	$\alpha$ -Trimmed Hotelling's $\tilde{T}^2$ Test . . . . .	156
7.6.6	Fröbenius Distance . . . . .	157
7.6.7	Bhattacharyya Distance . . . . .	157
7.6.8	Kullback-Leibler Distance . . . . .	158
7.6.9	Jensen-Shannon Distance . . . . .	159
7.7	Similarity Measure Between Images . . . . .	159
7.7.1	Earth Mover's Distance . . . . .	160
7.7.2	IRM Similarity Measure . . . . .	161
7.7.3	Region Weights Selection . . . . .	161
7.8	Experiments and Results . . . . .	162
7.8.1	Performance in Retrieval and Identification . . . . .	162
7.8.2	Effects of Color Constancy on Color Segmentation . . . . .	175
7.9	Conclusions . . . . .	182

<b>8</b>	<b>Conclusions and Future Work</b>	<b>185</b>
8.1	Conclusions . . . . .	185
8.1.1	State-of-the-Art Survey on Color Const. Methods . . . . .	185
8.1.2	State-of-the-Art Survey on Color Segment. Methods . . . . .	186
8.1.3	Continuous Color Formation Model . . . . .	187
8.1.4	A Color Constancy Algorithm . . . . .	188
8.1.5	A Color Image Segmentation Algorithm . . . . .	188
8.1.6	Comparing Images by Content . . . . .	189
8.2	Future Work . . . . .	190
8.2.1	Color Constancy . . . . .	190
8.2.2	Color Image Segmentation . . . . .	191
<b>A</b>	<b>Fredholm's IFK Equations</b>	<b>193</b>
A.1	Introduction . . . . .	193
A.2	General Linear Operator . . . . .	194
A.3	Integral Operators . . . . .	196
A.4	Analytical Solution of an IFK . . . . .	197
A.4.1	Symmetrical Kernels . . . . .	197
A.4.2	Nonsymmetrical Kernels . . . . .	198
A.4.3	IFK Solution with General Kernels . . . . .	201
A.5	Discretization of an IFK . . . . .	202
A.5.1	Quadrature Rule . . . . .	202
A.5.2	General Series Expansion . . . . .	203
A.5.3	Series of Singular Functions . . . . .	205
A.6	Conclusions . . . . .	207

# List of Figures

1.1	Examples of the importance of color vision. . . . .	2
1.2	Examples of color variation due to illumination changes. . . . .	3
4.1	Example of an idealized sensor function. . . . .	57
4.2	Some spectral power distributions . . . . .	70
4.3	Some reflectance functions . . . . .	71
4.4	Sensor sensitivity functions . . . . .	72
4.5	Continuous sensor function . . . . .	73
4.6	Continuous sensor response . . . . .	74
4.7	Reflectance recovery error from continuous colors (I) . . . . .	77
4.8	Reflectance recovery error from continuous colors (II) . . . . .	78
4.9	Reflectance recovery error from RGB (I) . . . . .	79
4.10	Reflectance recovery error from RGB (II) . . . . .	80
4.11	Color mapping error with least squares fitting . . . . .	85
4.12	Color mapping error with physical models . . . . .	86
5.1	Images in Simon Fraser University database. . . . .	107
5.2	Sets of some objects under all light variation. . . . .	108
5.3	Results using S&B distance and Finlayson's 2D-GM algorithm. . . . .	110
5.4	Results using S&B distance and our algorithm. . . . .	110
5.5	Results using RMSE distance and Finlayson's 2D-GM algorithm. . . . .	110
5.6	Results using RMSE distance and our algorithm. . . . .	110
5.7	Color constancy results: Ball set with light variation. . . . .	114
5.8	Color constancy results: Ball set with pose and light variation. . . . .	114
5.9	Color constancy results: Tide set with light variation. . . . .	114
5.10	Color constancy results: Tide set with pose and light variation. . . . .	114
6.1	Comparing our algorithm to that of F&H. . . . .	135
6.2	Example of our segmentation: Pepper images. . . . .	135
6.3	Example of our segmentation: Bear sequence. . . . .	136
6.4	Example of our segmentation: Shinchan sequence. . . . .	136
6.5	Comparing our algorithm to that of Figueiredo. . . . .	137
6.6	Set of images from the video sequence. . . . .	139
6.7	Sequence images segmented with Figueiredo's algorithm. . . . .	140
6.8	Sequence images segmented with our algorithm in Lab space. . . . .	141
6.9	Sequence images segmented with our algorithm in RGB space. . . . .	142
7.1	The COIL database. . . . .	163

7.2	Figueiredo's EM segmentation. . . . .	165
7.3	Graph-partitioning segmentation. . . . .	165
7.4	Segmentations of some objects through different poses . . . . .	166
7.5	Results with RGB Figueiredo's EM segmentation . . . . .	168
7.6	Results with Lab Figueiredo's EM segmentation . . . . .	169
7.7	Results with graph-partitioning segmentation . . . . .	170
7.8	Figueiredo's RGB and Lab precision vs. recall plots . . . . .	171
7.9	Precision vs. Recall plot corr. to graph-partitioning segmentation	172
7.10	Sets with light variation (I): Sets 1, 2, and 3. . . . .	176
7.11	Sets with light variation (II): Set 4. . . . .	176

# List of Tables

2.1	Color constancy techniques. . . . .	29
3.1	Monochrome image segmentation techniques. . . . .	33
3.2	Monochrome image segmentation techniques (Cont.). . . . .	34
3.3	Color image segmentation techniques. . . . .	50
3.4	Color image segmentation techniques (Cont.). . . . .	51
4.1	Error of the spectral reflectance recovery. . . . .	81
4.2	Error of the color transformations using least squares fitting. . . . .	87
4.3	Error of the color transformations using physical models. . . . .	87
5.1	Results using S&B distance, original images, and true illuminants. . . . .	111
5.2	Results using S&B distance and Finalyson's 2D-GM algorithm. . . . .	111
5.3	Results using S&B distance and our algorithm. . . . .	111
5.4	Results using RMSE distance and original images. . . . .	112
5.5	Results using RMSE distance and Finalyson's 2D-GM algorithm. . . . .	112
5.6	Results using RMSE distance and our algorithm. . . . .	112
7.1	Best and worst results for the Precision vs. Recall plots per method. . . . .	172
7.2	Object recognition results per method. . . . .	173
7.3	Intraclass and interclass Euclidean distances without CC. . . . .	178
7.4	Intraclass and interclass Euclidean distances with CC. . . . .	178
7.5	Intraclass and interclass Fréchet distances without CC. . . . .	178
7.6	Intraclass and interclass Fréchet distances with CC. . . . .	178
7.7	Percent difference (Euclidean case without CC). . . . .	180
7.8	Percent difference (Euclidean case with CC). . . . .	180
7.9	Percent difference (Fréchet case without CC). . . . .	180
7.10	Percent difference (Fréchet case with CC). . . . .	180
7.11	Percent reduction in intraclass distance (Euclidean case). . . . .	181
7.12	Percent reduction in interclass distance (Euclidean case). . . . .	181
7.13	Percent reduction in intraclass distance (Fréchet case). . . . .	181
7.14	Percent reduction in interclass distance (Fréchet case). . . . .	181
7.15	Percent difference (Euclidean case). . . . .	183
7.16	Percent difference (Fréchet case). . . . .	183
7.17	Percent reduction (Euclidean case). . . . .	183
7.18	Percent reduction (Fréchet case). . . . .	183

