特集 繊維分野におけるファジィ応用

コンピュータ・カラーマッチングへの ファジィ推論の応用[†]

大住 雅之*

1. はじめに

繊維業界は、戦後、日本のハイテク産業の象徴であった。機械的な自動化技術を進展させることで、生産効率を追求し、他国の追従を許さない、国内産業の要に発展していった。この傾向は今日の半導体やその他のハイテク産業に近似したものがあったと考えられる。しかし、今日では、いつのまにか成熟産業としてのイメージが定着してしまい、自動化レベルから見た場合、相当の部分について改善の余地を残しているのが現状である。理由は、繊維産業は製品対象が感性の上になりたっているものであり、その作業工程の中で、人間の経験と勘にたよっている部分が多いからである。特に染色加工業では、色彩、風合いといった感覚量で判断を下さなければならない場合が殆どであり、かつ、布という不定形でハンドリングが極めて困難な対象を扱わなければならない事に他ならない。

今回は、染色加工業の中でも特に色彩のコントロールの要である調色システムを主に報告する。

2. カラーマッチングシステム

カラーマッチングとは、客先から提示された色見本の色彩を製品で再現する為に、その調色要素

である、染色方法や染料配合を計算する事である。染色加工業の場合、殆どがオーダー生産であるので、必ず、この調色工程が存在する。これを自動的に行おうとすれば、色彩を計測する為の分光光度計と、コンピュータから構成される技術支援システムを用いて、色見本の分光反射率測定結果を基に、想定される染色方法での色材の種類の特定制や配合を理論計算で求める必要がある。この目的を達成させる為に、多くの色彩の数値化理論や混色理論を用いてコンピュータ・カラーマッチング(Computer Color Matching 以下 CCM)システムが開発されてきた(図1)。CCMシステムは、運用側面から考えて、次の計算機能が必要とする。

図1 CCMの問題点

[†] Computer Color Matching System Employing Fuzzy Concepts

* Masayuki OSUMI

日清紡 美合工場 システム開発課
Systems Development Section, Miiai Plant., NISHINBO INDUSTRIES, INC.

- ① 対象とする製品生地種に対し、適合可能性のある染色方法や染料の組み合わせに基づく正確な配合計算。
- ② 上記計算結果に基づく、最も適切な染色方法や、染料の組み合わせ方の評価及び決定。
- ③ 染色に供する染料液調合に関する調整計算。
- ④ 既に、1回染色を完了したものに対する再染色による修正計算。
- ⑤ 分光光度計の測定に関する補正計算。

上述の機能が連携しあって、人間の代行判断が可能な技術支援システムを実現できる事になる(図2)。

3. ファジィ推論の CCM への応用

3.1 混色計算への応用

カラーマッチングは基本的にその精度を確保する為には、与えられた計算条件(素材種、染法、染料種)の中で、反射率の予測精度を正確に行なう事が、計算精度の向上に結びつく。染色用途の CCM システムでは、一般には Kubelka と Munk が考案した光学濃度を用いた混色理論式が用いられている。

$$(K/S)_\lambda = \frac{(1-R_\lambda)^2}{2 \cdot R_\lambda} \quad (0 < R_\lambda < 1) \quad (1)$$

$(K/S)_\lambda$: 波長 λ におけるクベルカ・ムンクの光学濃度関数

K : 吸収係数

S : 散乱係数

R_λ : 波長 λ における反射率

λ : 波長

$$(K/S)_{\text{mix},\lambda} = F_{1\lambda}(P_1) + F_{2\lambda}(P_2) + \dots + F_{i\lambda}(P_i) - (i-1) \cdot F_{0\lambda} \quad (2)$$

$(K/S)_{\text{mix},\lambda}$: 波長 λ における混色後のクベルカ・ムンクの光学濃度関数

$F_{i\lambda}$: 染料 i の配合濃度に対するクベルカ・ムンクの光学濃度関数

$F_{0\lambda}$: 染色生地 of クベルカ・ムンクの光学濃度関数

P_i : 染料 i の配合濃度

図2 CCMへのファジィ理論の応用

しかし、本方法に基づくシステムでは、おおよそ次に示す様な欠点を持っている。

- (1) 現実には、Kubelka・Munk 関数の染料濃度に対するリニアリティーは確保できない。
- (2) 混色計算では、光学濃度 K/S の線形結合が成立しない。

混色計算に関連する上述の欠点を解決する手法として、データベースに登録された実績色を検索し、その結果を参考に処方計算を行なう CCS (Computer Color Search) が利用されているが、実用精度を得る為には、染色条件や被染物に見合う相当数のデータを蓄積する必要がある、これがネックとなって実用性を阻害する原因となる。即ち、染色では、製造上、その発色特性を支配する因子が膨大であり、運用面から考えると、被染物種、染色前の原反の前処理(精練・漂白等)条件、染色条件等、染色特性に影響を与えるパラメータが多く、それらが互いに非線型に関係しあっている。この為、単純なデータベースの参照機能では、少数データの場合、実在する状況を全て把握する事は不可能となる。計算精度を向上させる為には、前述の如く反射率の再現計算を如何に効果的に行なう

かに依存している。本システムは、色彩数値のベースを反射率に追っている。反射率スペクトルの補正には、色材配合空間に対するファジィ推論の規則を作成しており、補正量を推論計算によって求めている。補正量の調整は、実績データベース内の、被染物、染法、色材組み合わせのカテゴリー別に分類された、実績色(処方と反射率スペクトル)から求める。具体的な計算方法を、綿生地の場合、前処理として精練・漂白・シルケットの工程を経る。シルケット工程は水酸化ナトリウムの溶液中に生地を浸漬させる事で、綿の主要化学構造であるセルロースの結晶配列を変化させ、染料等の加工薬剤の吸収性や強度、表面光沢等を改質させるもので、水酸化ナトリウムの濃度により加工度に影響がある為、後に続く染色工程での発色性に大きな影響を及ぼす。また、反応染料を用いる浸染法では、染色浴と被染物の重量比である浴比によって吸尽率が異なる為に、染色性に相当の影響を与える。

被染物の前処理パラメータである水酸化ナトリウムの処理濃度を C_N 、浴比を D_p とする。この時の目標の分光反射率 R となる染料の配合 $x_1, x_2, x_3 \dots x_i$ を求める事が目的となる。上記指定条件下

で染料の配合に対する分光反射率の予測計算が正確に行えれば、配合の計算精度が向上する。この為に、次の式が考えられる。

図3 システムフロー

図4 色合せ精度の実績データ例

$$\begin{aligned}
 &K/S_{\lambda}(x_1, x_2, \dots, x_i, C_N, D_P) \\
 &= K/S_{T\lambda}(x_1, x_2, \dots, x_i, C_0, D_0) \\
 &\quad + Corr_{\lambda}(x_1, x_2, \dots, x_i, C_N, D_P) \quad (3)
 \end{aligned}$$

K/S_{λ} : 波長 λ における予測光学濃度

$x_1, x_2, \dots, x_i$: i 種からなる染料の配合

$K/S_{T\lambda}$: 波長 λ における純理論的な予測光学濃度

波長 λ における光学濃度の補正関

$Corr_{\lambda}$: 数でファジィ推論により計算される補正量

$Corr_{\lambda}$ は、ファジィ推論よりなる補正関数であり、ファジィプロダクションルールは、前件部が着色剤の種類 i 件と前処理パラメータ 1 件、染色パラメータ 1 件から構成され、後件部は補正值である 1 件となる。従って、例えば着色剤が 3 種である場合は、前件部は 5、後件部 1 のファジィ推論となる。この推論部分はスペクトル波長毎に行なう為、可視光領域 (400~700 nm) を分光光度計で 10 nm 毎に計測する場合は、31 チャンネル必要となる。ラベルは染料の場合、「多い」「少ない」の表現であり、それに程度が加わる。前件部の空間としては、染料の配合のみを考えた場合、単純には直行座標系で表現できるが、本推論の場合は、染料の合計配合値と、各染料の合計値の中での配合比を組み合わせた座標系で表現する。即ち、染料が 3 種類の場合は、合計配合値を表す軸と、合計

図 5 反射率補正出力結果例

配合値に対する各染料の配合を表現する正三角座標を組み合わせた、三角柱座標によって表現する。配合比の合計値は 0 から使用限度内までの値となるから、前件部のファジィメンバーシップ関数は、0 から使用限度濃度までの間を n 分割 (n は 2 以上) する。分割は等間隔に行ってもよいが、染料の合計配合値が比較的少量である淡色領域では、僅かな配合の変動でも色彩に与える影響は大きく、逆に着色剤の合計配合値が比較的多い濃色領域では、配合の変動に対する色彩への影響が小さくなる為、淡色領域では分割を密に、濃色領域では分割を疎になるように、指数関数的に分割の程度を変化させた方がより効果的である。波長 λ

図 6 混色時の光学濃度補正用メンバーシップ関数

におけるファジィラベルをまとめると次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 x_1^0 &= x_1 / (x_1 + x_2 + x_3) \\
 x_2^0 &= x_2 / (x_1 + x_2 + x_3) \\
 x_3^0 &= (x_1 + x_2 + x_3) / x_{\max} \\
 x_4^0 &= C_N / C_{N\max} \\
 x_5^0 &= D_P / D_{P\max} \\
 x_i &: i \text{ 番目の染料の配合} \\
 C_N &: \text{前処理パラメータ} \\
 C_{N\max} &: \text{想定される最大前処理パラメータ値} \\
 D_P &: \text{染色パラメータ} \\
 D_{P\max} &: \text{想定される艶消剤の最大添加量}
 \end{aligned} \quad (4)$$

5種の観測値をファジィ化する為のメンバーシップ関数を $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i5}$ とする。これらの関数は、上記 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_5^0$ が全て $[0,1]$ の範囲で正規化されている為、同様に $[0,1]$ の範囲で、必要に応じて、等間隔または不等間隔に n_i 分割し、分割点に対してメンバーシップ関数を形成する。ファジィ推論の為のファジィプロダクションルールは次のようになる。

$$\begin{aligned}
 R_i &: \text{if } F_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } F_2 \text{ is } A_{i2} \\
 &\quad \text{and } F_3 \text{ is } A_{i3} \text{ and } F_4 \text{ is } A_{i4} \\
 &\quad \text{and } F_5 \text{ is } A_{i5} \\
 &\quad \text{then } y \text{ is } B_i \quad (i=1,2,\dots,n)
 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで y は後件部の出力概念で、ある条件で作成された実測の分光反射率から計算される光学濃度と、作成条件から理論的に計算された光学濃度の差の程度を表すものである。また B_i は i 番目の後件部のメンバーシップ関数である。実測の光学濃度と理論光学濃度の差を表す y の概念は、次式の定義に従って計算される。

$$\begin{aligned}
 y &= (K/S)_{T\lambda} / (K/S)_{R\lambda} - 1 \\
 (K/S)_{T\lambda} &: \text{理論計算により求めた波長 } \lambda \text{ における光学濃度} \\
 (K/S)_{R\lambda} &: \text{実測の波長 } \lambda \text{ における光学濃度}
 \end{aligned} \quad (6)$$

このようにした場合、 y の値のとり得る範囲を想定しやすく、かつ推論結果の平滑性を確保しやすい。例えば y の範囲を $[-2.0, 2.0]$ のように想定して、後件部のメンバーシップ関数を規定する。

後件部メンバーシップ関数を、予め n 点の条件

で作成された生地で作成条件と実測反射率をデータベース化し、この情報を用いて正確なファジィ出力 y が得られるように、後件部メンバーシップ関数とファジィプロダクションルールを調整する。ここでは単純高さ法による非ファジィ化手法を用いて計算を行う。高さ法ではメンバーシップ関数は、出力概念 y に対する広がりを持たず、 y 軸上の位置とその高さのみの関数となる。この時の推論は、次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 B^0(y_i) &= [\omega_1 \wedge B^1(y_i)] \vee [\omega_2 \wedge B^2(y_i)] \dots \\
 &\quad \vee [\omega_n \wedge B^n(y_i)] \\
 y^0 &= \sum B^0(y_i) y_i / \sum B^0(y_i)
 \end{aligned} \quad (7)$$

以上の操作により、波長 λ における理論計算と実測の光学濃度の補正を推論する為の機構を構築する事になる。これにより、正確な光学濃度の予想、言い換えれば分光反射率の予想が可能となり、目標色に合致する為の調色計算の精度を飛躍的に向上させる事が可能となる。

3.2 総合評価への応用

混色計算に基づいて、計算された配合は、染色方法や染料の組み合わせ方によって、複数の候補が計算される事になる。実際には、この中から、堅牢度、染色コスト、メタメリズム、加工安定性など、総合的な判断に基づく最適評価が必要となる。

評価数値である染色コストやメタメリズムは、計算処方や、計算上予測された反射率スペクトルから容易に計算可能であるが、堅牢度といった染色特性の予測は理論計算で求める事が困難である為、上述の反射率補正と同様に、製品生地種、加工方法、染料配合空間ごとに実績データベースに格納されている、試験特性値を用いて推論規則を形成し、予測値を算出するようにしている。

評価項目には、それぞれにプライオリティーが設定できるようになっており、これを基に評価計算を行なう。評価した結果は、順位をつけられ出力される。推論評価には、前件部にメタメリンデックス、堅牢度、染色コスト(染料単価より計

図7 堅牢度特性予測出力結果例

算)、加工安定性(染色後の目標色との差を実績データとして保管)を、後件部には候補を2対比較した場合の出力値をとっている。

3.3 測定サンプルの測定値補正

客先から提示される見本サンプルの形態は様々である。生地の場合は、糸が交差・交編する3次元の形状を構造的に備えている。見本サンプルが印刷された紙や、糸である時には、光沢の有無や分光測定時に照射系の関係で射影が生じたりするので、測定値に影響を及ぼし、視感との差が調色の精度上、問題となる。表面形状差に起因する測定差の程度は、使用する分光光度計の光学系に大きく依存する。表面の凹凸が激しく、有効焦点深度が浅い光学系を持った分光光度計では、大きな差が生じる傾向がある。従ってこのような場合には、色見本を測定後、生産品の形状で測定した状態に反射率を補正する必要がある。実際の補正では、単に表面での凹凸だけであれば、ほぼスペクトルの全域にわたって反射率の差が一様に変化する事

が多く、色彩の表現値であるCIELab値では、特に明度を表わす L^* に対する依存性が強くなる。図は具体的な補正例で、サンプルとしてナイロンのトリコット地とレース地の交換を行なったもので、レース地は、トリコット地より凹凸が有り、反射率は全般的に低い値になっている。

機差の場合は、単純な表面形状差と比較すると複雑な挙動を示す場合が多い。センサーの受光特性やAD変換機、増幅器の特性に依存する為に、特定の傾向は現れ難い。このような場合は、広い色相空間にわたって相当数の変換則を作成する為のデータが必要となる。特に測定光学系に根本的な違いがある測色機間の機差を補正する為には、測定対象の表面形状も考慮した変換計算が必要となる。基本的な計算方法は、上述の形状変換と同じであるが、変換規則を作成する為のデータ点数は多い。本機能を用いる事で、ネットワークに接続された複数台の測色機から得られたデータの一元

図8 トリコットとレース地の表面形状補正

図9 機差補正出力例

管理や、客先の評価システムとの整合性向上に利用可能である。

両者ともに、ファジィ推論は、前件部に形状変換する対象物の視感判定上の表面粗さ、色相空間における明度値、彩度値、色相値を、後件部には反射率の補正值を出力させている。

3.4 染色液の調整に対する応用

染色を行なう際には、事前に染料やその他の染色薬品を所定濃度で調合しておく必要がある。この際に、CCMシステムから計算された色差が0となるような、調合液の修正手段をとった場合、修正に必要な染料の追加量が膨大となる場合がある。必要十分な最適修正を行なう為には、次の点に留意する。

- ① 視感上問題ない色差許容範囲の見極め。
- ② 計算誤差や調整の際の計量誤差の見極め。

図10 染料調合液の修正に関するイメージ

色差許容範囲に関しては、現在、一般的に用いられているのが、CIELab 色彩空間における色差 ΔE である。 ΔE は、次式によって計算される、色彩空間上の球体となる。

$$\Delta E = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}$$

しかし、厳密にはこの数値は人間の視感とは一致しない事が定説になっており、また、実際の許容値は、出荷先との感覚上の取り決めとなる。正確な見極めを行なう為には、製品、出荷先、色相毎に収集した合否データから、調整を行なう必要がある。本システムでは、明度、彩度、色相方向に ΔE の球体を楕円変形し、更に絶対的な大きさや、各方向に対するシフト量を実績合否データから逆推定する手法を用いて許容範囲を見極めている。これに加えて計算誤差と染料の追加量との兼ね合いで、修正の為の目標を決定し、最適手段を出力させるようにしている。

ファジィ応用の必要性は高いと認識している。

4. おわりに

本システムは現在、繊維用途に限らず、印刷、塗料、プラスチックの着色等、様々な分野で利用されている。通常は、対象アプリケーションによって、発色理論や色彩特性が大幅に変わる為に、計算部分の転用は極めて困難であるが、容易に他用途への展開が可能であったのも、混色計算部分にファジィ理論を応用した為に、飛躍的に柔軟性が高まり、適用範囲が広まった事に他ならない。当社では、本システムを、繊維分野だけではなく、紙の着色工程におけるインラインの調色制御や、塗装関係の生産工場へも設置しており、高い精度と効果を確認している。

また、本システム以外に、弊社では色彩の出荷管理システムの合否判定や、生産計画支援システムへもファジィ理論を応用したシステムを開発している。特に染色工程のスケジューリングに関しては、納期、品質を維持する為のノウハウ、染色機の効率化の要素が競合条件となる為に、段取りに対する細心の配慮が必要となり、経験者の判断が欠かせず、自動計算の要望が高かった。

繊維製品の染色加工は、経験者に依存する部分が多く、今回の CCM システムへの適用以外にも、

参 考 文 献

- 1) 井上：色彩管理について；加工技術，Vol23 No. 9 pp.18-22(1988)
- 2) 大萩，中岡，田村：色彩管理の現状；加工技術，Vol23 No.10 pp.6-16(1988)
- 3) 村田：CCM の応用技術；加工技術，Vol20 No.4 pp.34-38 No.5 pp.57-62(1988)
- 4) 村田：コンピュータカラーマッチングの実用性について；加工技術 Vol18 No.4 pp.1-7(1973)
- 5) 村田：工業測色学；繊維社 JIS Z8729 $L^*a^*b^*$ 表色系及び $L^*u^*v^*$ 表色系による物体色の表示方法
- 6) 浅井，寺野，菅野：ファジィシステム入門；オーム社
- 7) 広田：ファジィシステムの実用化基礎理論と応用事例；技報社
- 8) 塚本：Fuzzy 推論について；数理科学，5(1979)
- 9) Mamdani E.H., Assilian S.; *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*, *Int.J.Man-Math.Stud.*, Vol7, pp.1-13(1974)
- 10) 菅野：ファジィ制御；日刊工業新聞社
- 11) 大住：ファジィ理論を応用した CCM システム；染色工業；Vol.38. No.7, pp.349-357(1990)

(1996年10月31日 受付)

[問い合わせ先]

〒444 愛知県岡崎市字入込45
日清紡 美合工場 システム開発課
大住 雅之
TEL : 0564-57-2454
FAX : 0564-58-3816
E-mail:nbkcolor@mx.meshnet.or.jp

著 者 紹 介

大住 雅之 (おおすみ まさゆき)

日清紡 美合工場 システム開発課

昭和58年 東京農工大学工学部繊維高分子工学科卒。同年4月 日清紡入社。昭和59年 美合工場研究所に配属後、染色色相管理システムの開発・研究に従事、その後もファジィ理論応用の生産計画支援システムや色相検査システムの開発を続け現在に至る。日本ファジィ学会、日本色彩学会会員。