

液晶ディスプレイ開発における光線追跡シミュレーション

Ray Tracing Simulation for LCDs Development

小山 義孝*

Yoshitaka Koyama

要 旨

最近では多くの液晶関連メーカにおいて、バックライトユニットの部材である導光板や光学シートの開発に、照明解析用の光線追跡シミュレータが利用されている。これに伴って、光線追跡シミュレータには、偏光機能や薄膜コーティング機能などの液晶ディスプレイの開発に有効な機能が搭載されてきている。本稿では、照明解析用光線追跡シミュレーションをバックライトユニットの開発に活用した例を紹介する。

Recently, in many LCD related makers, the ray tracing simulator for lighting analysis has been used to develop light guide plates and optical sheets, which are the parts of a backlight unit. As the result, the effective functions for LCDs development, such as a polarization analysis function and a thin film coating function, has been carried in the ray tracing simulator. This paper introduces the example that utilized the ray tracing simulation for lighting analysis in development of backlight units.

まえがき

近年、液晶ディスプレイは携帯情報端末や携帯電話などのモバイル機器に搭載されている。この分野の商品は携帯性向上のための軽量化や低消費電力化が強く求められている。しかも、屋外で使用されることが多いため、他の用途のディスプレイよりも画面の明るさが必要である。

こうした要求の中、当社では、液晶ディスプレイのバックライトユニット、及びフロントライトユニットの薄型化、光利用効率の向上を図るため、光線追跡シミュレータを活用して照明解析を行い、開発の効率化を実現している。

最近では各社から市販されている光線追跡シミュレータにおいて、液晶ディスプレイ開発向けに新機能

が追加されており、バックライトユニット開発の効率化に寄与している。

以下、第1節において、当社におけるバックライトユニット開発の解析事例を交えて照明解析用光線追跡シミュレータの基本的な機能を説明する。第2節において、最近搭載されてきている液晶ディスプレイ開発において有効な機能について紹介する。

1. 光線追跡シミュレータの基本機能

本節では、まず、一本の光線の軌跡を追うため、幾何光学の基礎式であるフレネルの式¹⁾について説明する。次に、光線追跡シミュレータの一般的な数値解法である、モンテカルロ法²⁾について説明する。最後にバックライトユニットの解析モデルについて説明する。

1.1 フレネルの式

光源から発生された一本の光線が、空間に配置された光学部材に到達した時の反射光、透過光について、そのエネルギーはそれぞれフレネルの式によって表せる。

今、図1のように屈折率 n_1 の均質、等方性の媒質が

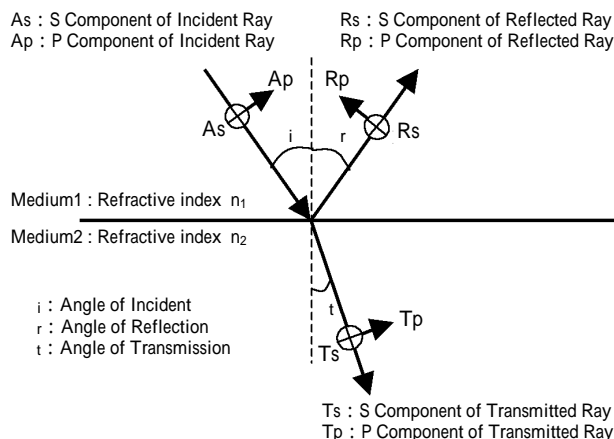


図1 電場の偏光成分

Fig. 1 Electric field components of polarization vector.

* TFT 液晶事業本部 IT 推進室

ら屈折率 n_2 の媒質へ入射角 θ_i で入射する光を考える。入射光平面波の電気ベクトルの入射面に含まれる成分をP偏光, 入射面に垂直な成分をS偏光と呼ぶ。図1におけるS偏光の向きは紙面に垂直な方向である。

P偏光, S偏光それぞれのエネルギー反射率/透過率は, 以下の式により求めることができる。但し, ここでは光の吸収は考えないものとする。

P偏光エネルギー反射率

$$r_p = \left| \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right|^2$$

S偏光エネルギー反射率

$$r_s = \left| \frac{n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_i} \right|^2$$

P偏光エネルギー透過率

$$t_p = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right) \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2$$

S偏光エネルギー透過率

$$t_s = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right) \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2$$

垂直入射の場合, P, S成分の区別はなくなり,

$$\text{エネルギー反射率} = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right|^2$$

$$\text{エネルギー透過率} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

となる。

光線追跡シミュレータにおいては, 通常, 解析したい光学系モデルの各部材の光学属性として屈折率を与える。そして, 部材の面に光が到達した時に, その入射角度と両側の媒質の屈折率からフレネルの式を用いて計算を行う。通常は無偏光として, P偏光, S偏光の反射率/透過率の計算を行った後, その平均値を境界面での反射率/透過率として用いる。すなわち,

$$\text{反射率} = (r_p + r_s) / 2$$

$$\text{透過率} = (t_p + t_s) / 2$$

として, 反射光, 及び透過光の光線のエネルギーを決定する。

1・2 光線追跡シミュレーションにおけるモンテカルロ法

照明系の解析を行うためには, 多数の光線を発生させる必要がある。ほとんどの光線追跡シミュレータは光線の発生, 管理にモンテカルロ法を採用している。

モンテカルロ法は, 問題の解を数値的に求めるために, ランダム変数の値を次々に使って評価する方法である。これらの変数は問題に潜む物理的な振る舞いの数学的シミュレーションを行うなど, 元の問題をある確率的な過程に置き換えて解を求める場合に使われる。

光線追跡では, まず, 光源として設定された面上の多数の点からの光線の放射を考える。それぞれの光線が空間上に配置された物体面上に到達する座標を光線追跡計算により得る。これら一本一本の光線の持つエネルギーを考慮した集計結果から, 照度分布などを計算している。

光源から光線を射出するためには, 射出点の座標とその方向を決める必要がある。モンテカルロ法では, これらの数値の決定に擬似乱数を用いる。この時, 全ての光線が等しいエネルギーを持つこととし, これら光線の射出方向, 或いは発生位置の密度のみによって光源の配光特性を示すように発生確率を定める。(図2)このように定めることにより, 全ての光線が同じエネルギー量を表わすことになり, 光線追跡結果のデータ集計の処理が簡単になる。

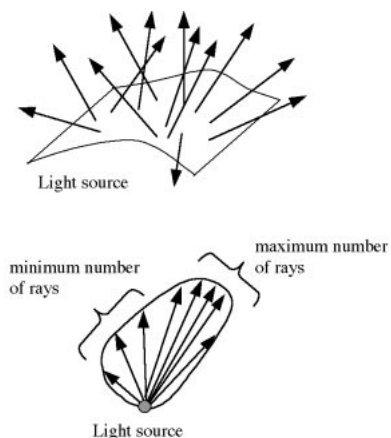


図2 モンテカルロ法による光線の生成
Fig. 2 Ray generation by Monte Carlo Method.

光線追跡シミュレータは, 光源から発生した一本の光線が光学の法則に従って光学系の物理現象を再現する。光源から射出された光線は, その途中で到達する物体の面上において, 反射光と透過光に分かれる。その時どのように光線を追跡するかはシミュレータに依

存している。例えば、

(1) 両方の光線を追跡する。

図3(1)の例では、到達した4本の光線からそれぞれ透過、反射の光線(計8本)を追跡する。

(2) 反射率と透過率を比較してエネルギーが優勢な方のみを追跡する。

図3(2)の例では、到達した4本の光線からエネルギーが大きい透過光のみの光線(計4本)を追跡する。

(3) 反射率と透過率を考慮した確率に応じて反射光あるいは透過光の一方のみを追跡する。

図3(3)の例では、到達した4本の光線から、3本を透過光、1本を反射光(計4本)として追跡する。

などがある。

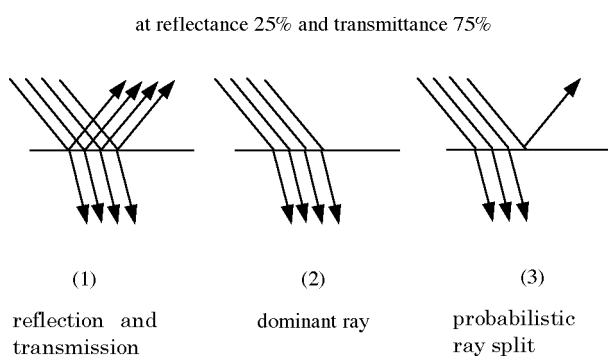


図3 境界面における光線分岐
Fig. 3 Ray split on the boundary.

液晶のバックライトにおいては多重反射が起こるため、計算時間を考えると(3)の方法が有効である。但し、確率的に決定された光線追跡の結果が実際の物理現象と精度良く合うためには、大量の光線本数が必要であり、複雑な解析モデルによっては数十万本から数百万本の光線が必要なこともある。

1.3 バックライトユニットの解析モデル

バックライトユニットの解析モデルについて説明する。液晶ディスプレイのバックライトユニットを構成する主な光学部材は以下のようなものである。(図4)

(1) ランプ光源

主に、冷陰極管が使われる。最近はモバイル機器向けにLEDも使われている。

蛍光管やLEDなどの光源は、光学部材としての光学属性とは別に、光源として発生する光量や配光特性を与える必要がある。複数の波長を扱えるシミュレータでは、発光スペクトルも与えることができる。

(2) 導光板

光源から発生した線状の光を、液晶パネルへ入射す

るための面光源に変換する透明樹脂の板である。底面には輝度均一化や輝度向上のために、プリズム加工やドット印刷加工などが施されているものがある。

導光板などの透明樹脂部材は光学属性として屈折率を与える。フレネルの式により、光線が部材に当たる入射角度から反射率/透過率が求められる。もしも、部材内での吸収を考慮したい場合は、光学密度を設定することができる。この値により、媒質内を進んだ距離に応じた光線エネルギーの吸収を考慮することができる。

(3) 光学シート

導光板からの出射光を反射、拡散、集光させるなどの役割を持つ。正面方向に配光性を持たせる拡散シートや、正面輝度を向上させるプリズムシートなど、その目的によって様々なシートがある。

プリズムシートのように透明な場合は、導光板と同じように屈折率を与える。

拡散シートや拡散板などの部材は、シート表面に微細な形状や内部に散乱物質が散布されており、その形状をモデル化することは難しい。このような場合、その部材の反射率及び透過率を測定によって求め、得られた散乱特性を部材の光学属性として設定する。

(4) ランプホルダ、反射シート

ランプや導光板を覆う反射板であり、ランプや導光板から漏れた光を導光板へ戻し、光を再利用する。鏡面反射タイプと散乱反射タイプがある。

光学属性としては、前者の場合は反射率を、後者の場合は散乱特性を設定する。

光線追跡シミュレーションでは、光学部材以外に光線を追跡した結果を集計するための面を設定する必要がある。本稿ではこの面を評価面と呼ぶこととする。評価面は一つの解析モデル内に複数設定することができる。計算結果として得られる情報は、それぞれの評価面における照度分布、輝度分布、出射角度特性などである。少なくとも一つの評価面の設定は、測定結果と比較するために、測定器の光学系と合わせることが

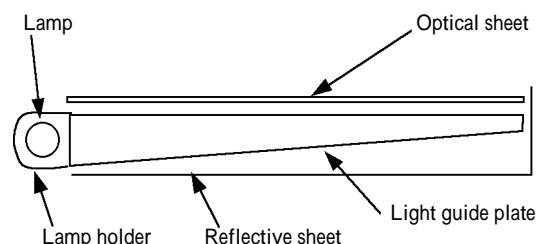


図4 バックライトユニットの構成図
Fig. 4 Diagram of a backlight unit.

重要である。例えば、輝度の測定であれば、測定器の受光角度より、評価面の光線受光角度を、測定器のスポット径の面積より、評価面のメッシュ分割数を決定する。

バックライトユニットの開発においては、特に輝度分布と出射角度特性を確認することが多い。輝度分布の計算結果により、バックライトの面内輝度分布の均一性を検討することができる。また、出射角度特性の計算結果により、視野角特性の検討や正面輝度の向上を図ることができる。

1.4 プリズムシート解析事例

当社において実施した小型液晶ディスプレイ用のプリズムシートの解析事例を紹介する。プリズムシートは、導光板の上に配置され、導光板から出射された光を正面方向へ集光し、正面輝度を向上させる役割を持つ光学シートである。

解析したモデルは、2枚のプリズムシートのプリズム方向を直交させて配置し、上下のプリズムシートの頂角をパラメータとして、より正面輝度が高くなる頂角の組み合わせを検討した。(図5)

今回、ランプと導光板は決定していたため、その光学系に最適なプリズムシートの特性を検討するために、導光板からの出射光の角度特性を測定し、その特性を面光源として設定した。評価面の設定は出射角度特性を観測する設定とし、観測する角度の刻みを5度刻みとした。光線本数は50万本、計算時間はおよそ5時間で誤差は10%であった。

図6にその解析結果を示す。グラフの横軸はプリズム上面に出射した光の出射角度である。プリズムの頂角の組み合わせによって、ピーク強度で1.3倍の差が出ている。また、角度特性の差も評価することができる。

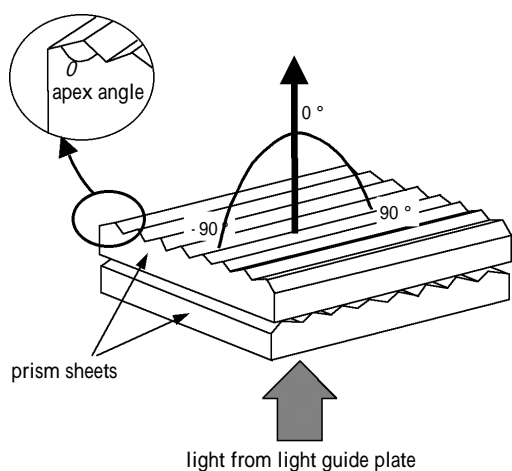


図5 プリズムシートの模式図
Fig. 5 Diagram of prism sheets.

る。このようにシミュレーションを活用することによって、パラメータは自由に設定することができ、悪い組み合わせから良い組み合わせまで確認することができる。

今回は、プリズム頂角の組み合わせのみをパラメータとした事例を紹介したが、プリズムピッチ、プリズム深さ、プリズムの材質など、他にも考慮すべきパラメータはいくつもあり、試作前にこれらパラメータの組み合わせについて光線追跡シミュレータを用いて仮想実験し、最適な組み合わせ条件を求めることで、試作コストの削減及び、開発期間の短縮を図ることができる。

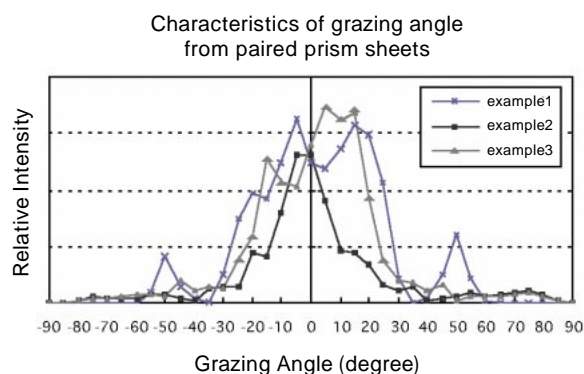


図6 解析結果グラフ
Fig. 6 Result of ray tracing simulation.

2. 液晶ディスプレイ用の機能

本節では、主に液晶ディスプレイの開発に有効な機能について紹介する。

2.1 テクスチャマッピング機能³⁾⁴⁾

バックライト用の導光板は、蛍光管ランプのような線状光源を液晶パネル全体を照射するための面光源に変換するために用いられる。当然、面全体の明るさが均一であることが望まれる。そのための手法の一つとしてドット印刷がある。これは、導光板底面に白色のドットパターンを印刷することで、そのドット部分に当たった光を散乱反射させる。面全体で均一な明るさを得るために、導光板内の位置によりドットの大きさや密度が異なる。一般的には、光源付近はドットは小さく密度を疎に、光源から遠ざかるに従ってドットを大きく、密度を密とする。

このドット印刷パターンを容易に設定し、計算できるように追加された機能がテクスチャマッピング機能である。この機能は、ドット印刷パターンの分布を

ビットマップ等の画像データで作成し、導光板の底面に貼り付ける操作を行う。元となる導光板の光学属性とドット部分の光学属性を各々設定できるため、ドット印刷タイプの導光板の光線追跡が可能となる。

従来の機能でドット印刷タイプの導光板を解析するためには、導光板の底面に対してドット部分を別の面として作成する必要がある。このようなモデルを作成するには煩雑な作業が必要であり、また、面の数が膨大になるため、シミュレータの操作レスポンスが悪くなったり、解析時間も多くの時間を必要としていた。

2・2 偏光機能⁵⁾⁶⁾

液晶ディスプレイは光の偏光状態を利用した表示装置である。一般的な液晶パネルには偏光板が付いており、バックライトユニットから液晶パネルに入射する光を直線偏光に変換している。偏光板を通過することでバックライトからの光量はおよそ1/2になる。このような部材を解析するためには直線偏光子の設定が必要である。また、光の利用効率を上げるため、偏光成分を分離し、一方の成分を透過、もう一方をバックライトユニット側へ反射して再利用するような光学シートが出ている。(図7)このような光学シートを解析するためには偏光成分それぞれを追跡する必要がある。

光線追跡シミュレータの偏光の設定としては、

- (1) 光線の偏光状態の設定
- (2) 部材の面への偏光素子としての設定

をすることになる。これらを設定することにより、偏光素子を通過後の光線の偏光状態やエネルギーを確認することができる。

2・3 薄膜コーティング機能⁷⁾

バックライトユニットの部材には、一部の面に対して反射防止膜など、誘電体材料や金属材料からなる光

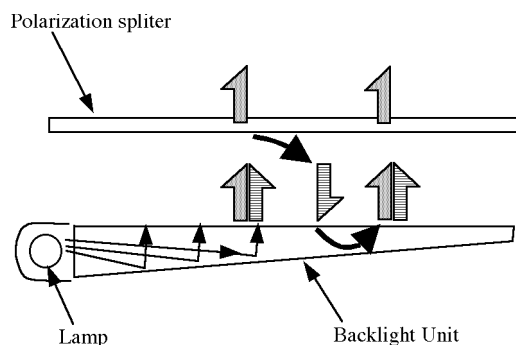


図7 偏光分離シートの模式図

Fig. 7 Diagram of polarization splitter.

学薄膜をコーティングすることがある。これらの多層膜の分光特性を光学属性として設定可能にしているのが薄膜コーティング機能である。

薄膜コーティング機能では、フレネルの式や測定などにより、設定したい媒質間での波長毎、入射角度毎のP偏光、S偏光のエネルギー反射率/透過率を予め求めておき、その値を面の光学属性として設定することができる。

図7に示した偏光分離シートのようなモデルでは、その面の光学属性としてコーティング面として、P偏光、S偏光の反射率、透過率を与え、先に紹介した偏光機能との組み合わせにより、P偏光、S偏光それぞれの光線を追跡することができる。

むすび

本稿では、光線追跡シミュレータに搭載されてきた液晶ディスプレイ向けの機能をいくつか紹介した。従来の基本機能に加え、偏光機能などの追加により、多様な光学部材の解析が可能となり、バックライトユニット開発にとって更に有効な手段となっている。

しかし、最近では導光板や光学シートには数 μm といった微細な加工が施された部材が出ている。こうした部材を解析するためには、光の干渉や回折といった光を波動とみなした現象を解く必要がある。波動光学シミュレータとして、マクスウェルの方程式をFTTD法や有限要素法を用いて解いているものもあるが、解析領域が数 μm ~数十 μm と小さく、バックライトのような数mm以上のモデルを解析することは現状ではできない。今後、光線追跡シミュレーションと波動光学とが融合したシミュレータの登場が期待される。

参考文献

- 1) M・ボルン, E・ウォルフ, "光学の原理I", pp. 59-78, 東海大学出版会(1974)
- 2) 牛山善太, "光設計とシミュレーションソフトの上手な使い方", pp.70-81, オプトロニクス社(1999)
- 3) "LightTools Core Module User's Guide Version 3.0", chapter8 p.p.3-6, Optical Research Associates(2000)
- 4) "Specter User's Manual", TEXTURES And LABELS, (CD-ROM), INTEGRA, Inc(1999)
- 5) "LightTools Core Module User Guide", chapter8 p.p.32-43, Optical Research Associates(2000)
- 6) "Specter User's Manual", ATTRIBUTES and LIGHTS, (CD-ROM), INTEGRA, Inc(1999)
- 7) M・ボルン, E・ウォルフ, "光学の原理I", pp. 78-103, 東海大学出版会(1974)

(2001年5月18日受理)