

解説**CRT 上への物体色のリアルな表示**

富永昌治

大阪電気通信大学工学部精密工学科 〒567 寝屋川市初町 18-8

(1991年9月2日受理)

Realistic Display of Object Color on a CRT

Shoji TOMINAGA

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering,
Osaka Electro-Communication University,
18-8, Hatsucho, Neyagawa 572**1. はじめに**

近年、計算機で画像を生成するのが一般的になっている。リアルな画像を生成するための基本的問題は、カラーディスプレイ装置上での正確な色再現にある。通常、画像の表示色はR、G、Bの3原色の値で指定する。しかし、具体的な物体の表面色とディスプレイ上の色を等色にすることは容易でない。これにはカラーモニターの発色特性が一つの原因となっている。モニターの入出力関係は非線形で、しかも3原色R、G、Bの色度を含めて、発色特性は装置によって異なるからである。

ところで、全ての物体色はモニター上でR、G、Bの加法混色のみで生成されるが、物体を絵の具のように1色で平面的に塗り付けるだけでは、その物体の持つ材質感がリアルに現れない。たとえば、金や銅の金属感はカラーパレット上で作り出すことができない。金はあざやかな黄色に、銅は赤味がかったオレンジあるいは茶色に見える。これは、光が物体を照明して、その反射光が眼に入射する過程を無視しているためで、3次元的な光反射による色光の微妙な変動が材質感を伴う色知覚となる。すなわち、物体色のリアリティは光反射の3次元世界を模擬することにより、はじめて現れるものである。

コンピュータグラフィックス(CG)の分野では、物体をリアルに見せるための表示方法が種々開発されている¹⁻³⁾。通常、3次元空間の物体表面の色を計算するために光反射モデルが使用される。これまでに、いくつかの光反射モデルが提案されているが、この陰影づけ

(シェイディング)によって物体のリアルな色や材質感が表される。また最近、自然環境下における物体の正確な表示のために、測色データを積極的に使用する研究もある⁴⁾。なお、これまでのCGにおける色の計算は、R、G、Bの3原色成分のみの数値計算に基づくことが多かった。現実の物理世界を模擬するには、色の計算を分光的に波長ごとに行う必要がある。R、G、Bのみのアルゴリズムでは、物体の表面反射率といった物理量を組み込んだり、反射光の輝度計算が困難で粗い近似にとどまる。

本稿では物体のリアルな表現をカラーディスプレイ上で行うための一般的手法について解説する。まずモニター上の表色や色較正に関する基本原理を述べる。次に、リアルな物体色表示のためのツールとして光反射モデル、およびCGの技法について、筆者らが使用している手法を中心に解説する。

2. カラーモニターの特性

自然色が表示可能な画像表示装置として、R、G、B各色について8ビットのリフレッシュメモリを持つ装置が一般的である(図1参照)^{5,6)}。これは、出力カラー画像の各画素ごとに 2^4 、すなわち約1,600万色の表色機能を持つ。この場合の表色値はモニターのRGBの3次元色空間座標として指定されるが、この色空間は人間の色知覚空間そのものではない。まずR、G、Bのデジタル値と実際にモニターで発光する輝度値は線形ではない。またR、G、B3原色の色度は機種によって異なる

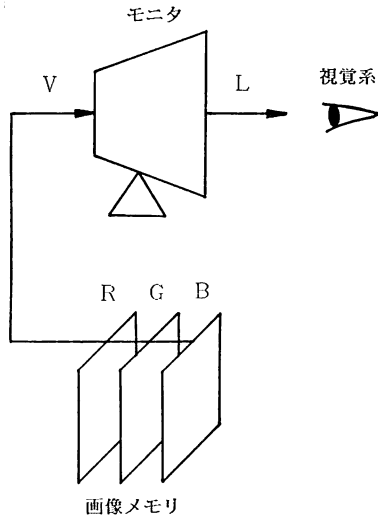


図 1 一般的なカラー画像表示装置

り, RGB 空間の同じ座標でも色は違って見える。

2.1 ガンマ特性

モニターの印加電圧 V と発光輝度 L の関係は線形ではなく, 一般に次のような関係にあるといわれている。

$$L = cV^\gamma \quad (1)$$

ただし, c は定数で, γ は 2~3 の値をとる。印加電圧は入力した RGB 値に比例するので, 同様な関係が RGB 値と輝度値の間に仮定される。この関係を線形にすることが一般にガンマ補正と呼ばれる処理である。図 2 に実際のパソコン用カラーモニターについて, 輝度計を用いて測定した結果を示す。RGB の値と輝度値の関係を示す各曲線は, 現実には (1) 式のような少数のパラメータで記述できるほど単純ではない。

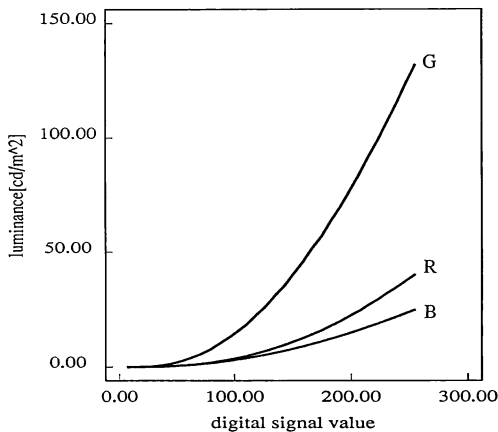


図 2 モニターの発光輝度と RGB デジタル値の関係

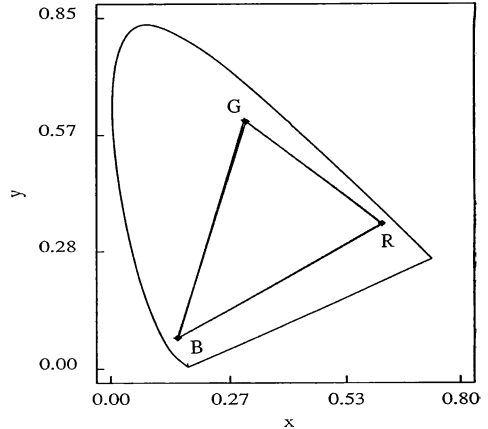


図 3 RGB 3 原色光の色度座標と色再現の可能領域

ガンマ補正には 2 通りの方法がある。一つは RGB 値と輝度値の関係を関数形で厳密に求める方式で, 関数形を選択が問題になるが, 適合がよければ, 補正は効率的である。他方は, 必要な対応関係だけをルックアップテーブルにしておく方式で, より直接的で便利といえる。

2.2 蛍光体の色度

モニターの R, G, B 各蛍光体の色度座標を把握しておくことはきわめて重要である。3 原色光の色度によってモニターで再現できる色領域が定まり, 表色のための変換も決定することができる。色の表現は国際照明委員会 (CIE) の XYZ 表色系を使用し, 任意の色光の色度はこの表色系の xy 色度図で指定される。図 3 に実際のモニターについて, 蛍光体の色度座標を示す。三つの色度点が形成する 3 角形の内部が色再現可能領域である。

3. 忠実な色再現

希望する色をモニター上に再現する問題は, CIE の XYZ 表色系から, モニターによって決まる RGB 表色系への写像の方法を定めることに帰着する。図 4 に示す観測モデルにおいて, 観測者が原画からの色光とモニターからの色光を等色と判断することは, 視覚系の 3 種類の色刺激値が二つの色光に対して等しくなることを意味する^{7,8)}。色刺激値として 3 刺激値 X, Y, Z が使用される。いま原画とモニターに対する 3 刺激値をそれぞれ X_s, Y_s, Z_s および X_M, Y_M, Z_M とする。もし $X_s = X_M, Y_s = Y_M, Z_s = Z_M$ が成立すれば, 正常な観測者が見た場合, 二つの色光は等色と判断される。

ここで R, G, B の各成分に対する 3 刺激, X_i, Y_i, Z_i ($i=R, G, B$) を用いれば, モニターの色刺激値の加

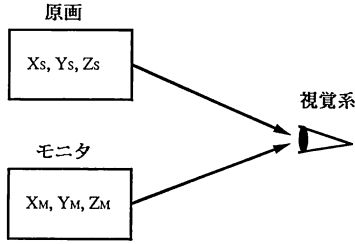


図4 観測モデル

法性より、原画とモニターの等色条件は、

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R + X_G + X_B \\ Y_R + Y_G + Y_B \\ Z_R + Z_G + Z_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

のように行列で表現できる。

さてモニターの蛍光体の発色特性は通常、色度 (x, y) と輝度 L の三つの数値の組で特徴づけられる。

- R : $(x_R, y_R), L_R,$
- G : $(x_G, y_G), L_G,$
- B : $(x_B, y_B), L_B,$

刺激値 Y は輝度 L に対応する。特に $L_{Rmax}, L_{Gmax}, L_{Bmax}$ を各原色の最大輝度で、RGB 各8ビットのデジタルディスプレイ装置で最高レベル255の時の輝度値とする。

いまモニターの RGB 値 $D_i (i=R, G, B)$ と輝度値 L_i の関係を線形と仮定するとき、目標とする XYZ から RGB への変換式は次のように与えられる⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで T は変換行列で、この値は行列

$$M = \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{L_{Rmax}}{255} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_{Gmax}}{255} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_{Bmax}}{255} \end{bmatrix} \quad (4)$$

の逆行列 $T = M^{-1}$ として算出される。

計算では、 D_R, D_G, D_B の値は区間 $[0, 255]$ のアナログ値として算出されるが、最終的にはデジタル値に変換する。この段階で最も重要な処理はモニターのガンマ特性の補正である。輝度値と RGB 値には図2のよう

な非線形関係が存在するので、これらの逆の非線形性を D_R, D_G, D_B に作用させることにより、入出力関係を線形に保つことができる。この補正は高速化のため通常ルックアップテーブルの形で行われる。

4. 物体色の表示

3次元物体を画像としてリアルに表現する技法をCGの分野ではシェイディングと呼ぶ。これは物体の見える面に陰影をつけることで、具体的には、モニターに表示する物体表面の色光分布を計算し、それに応じた輝度分布を出力することである。シェイディングを行うために、通常、光反射モデルが使用される。この光反射モデルによって光源からの照明光が物体表面で反射し、その色光が目到達する過程が模擬される¹⁰⁾。

4.1 代表的な光反射モデル

光反射モデルは、物体表面の光学的性質、物体に入射する照明光の性質、および照明・観測の幾何学的性質に基づいて構築される。ここでは代表的な Phong のモデル¹¹⁾ と Blinn^{14,15)} のモデルについて説明する。モデルの詳細な記述は文献にゆずり、色光のスペクトル計算における特徴と適用性を中心に説明する。

4.1.1 Phong のモデル

図5は光源から物体に入射した光が、物体表面から反射して眼に入射する過程を示している。一般に物体表面から反射される光は、鏡面反射と拡散反射の二つの加法的成分に分解することができる。前者は物体表面と空気層の間の境界で反射する成分である。鏡面からの反射のように、反射光は視覚の狭い範囲でのみ観測される。後者は物体の表面を通過した光について生じる。光が物体内部の着色層に入射すれば、色素粒子との間で光の散乱が起こる。図5で黒丸や黒四角は色素粒子を表す。この散乱を受けた光は再び空気中に戻った場合のみ観測される。したがって拡散反射成分は強い方向性を持っていない。

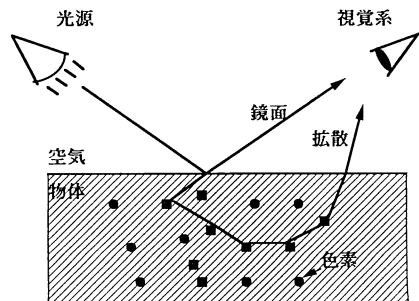


図5 光反射の過程

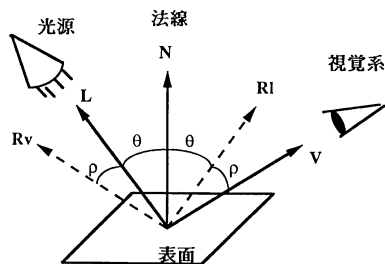


図 6 Phong モデルのための反射幾何

図 6 に反射の幾何学的モデルを示す。まず、 N は物体表面の法線ベクトル、 L は光源方向を示す単位ベクトル、 V は視点方向の単位ベクトルである。また R_1 と R_v は、それぞれ、光の反射方向と視線の反射方向を表す単位ベクトルとする。鏡面反射成分はベクトル R_1 の方向に最も強く、この方向から角度がずれるに従って、強度が急激に減少する。ずれ角を ρ として、Phong¹¹⁾はこの減少割合を $(\cos \rho)^n$ で表した。指数 n は表面粗さの測度で、 n が大きいほど鏡に近くなり、シャープなハイライトが得られる。 n が小さければ光沢も小さくなる。一方、拡散反射は Lambert の法則に従うものと仮定している。すなわち拡散反射光の強度分布は入射角の余弦 $\cos \theta$ 、すなわち N と L の内積で決まり、見る方向 V とは無関係である。

以上の基本的性質に基づいて、反射モデルは次式のように記述される。

$$I(\lambda) = K_a(\lambda)I_a(\lambda) + K_d(\lambda)(N \cdot L)I_i(\lambda) + K_s(\lambda)(R_v \cdot L)^n I_i(\lambda) \quad (5)$$

ここで反射光 $I(\lambda)$ は波長 λ の関数である。右辺第 1 項は環境光 (I_a) による寄与を表し、対象とする照明光 (I_i) のものではない。第 2 項と第 3 項が拡散と鏡面の成分を表す。第 3 項の内積 $(R_v \cdot L)$ は $(R_1 \cdot V)$ と等価で、 $(\cos \rho)$ を意味する。 $K_a(\lambda)$ 、 $K_d(\lambda)$ 、 K_s は物体の光学的性質を規定する重要なパラメータで、表面反射率を表す。普通、物体色に直接寄与する分光反射率といえは、拡散反射率 $K_d(\lambda)$ のことを指す。

Phong のモデルで注意すべき点は、鏡面反射率 K_s が波長 λ に依存せず一定値をとることである。このことは鏡面反射成分の色度は常に照明光と一致し、物体のハイライトは光源色を持つことを意味する。すなわち、Phong のモデルは 2 種類の色成分の反射モデルとなり、拡散反射は物体色そのもので、鏡面反射は照明光の色である。筆者らはこの仮定が現実に妥当かどうかを調べる方法を開発した¹²⁾。その結果、多くの不均質物体について妥当であることが判明した^{12,13)}。すなわち、こ

のモデルはプラスチックやペンキなどの不均質物体の記述には適用できる。しかし、金属のような均質物体で、鏡面反射成分に物体色を持つような複雑なものの記述には十分でないといえる。

4.1.2 Blinn のモデル

金属感を表現することは容易ではない。表面を磨いた金属からの反射光は大部分が鏡面反射成分である。この成分が金属の物体色になる。鏡面反射が波長の関数になるとともに、しばしば入射角にも依存するようになる。さらに物体表面を拡大してみれば、必ずしもなめらかでなく、でこぼこしている場合が多い。鏡面反射のためにモデルを改善したのが、Blinn¹⁴⁾ および Cook と Torrance¹⁵⁾ である。ここではこれらをまとめて Blinn のモデルと呼ぶことにする。

図 7 に反射の幾何学的モデルを示す。単位ベクトル L と V はそれぞれ光源と視点を向く方向ベクトルで、 H はこれらの 2 等分ベクトルである。 H と法線ベクトル N との角を α としている。反射モデルは次のような一般式で記述できる。

$$I(\lambda) = K_a(\lambda)I_a(\lambda) + K_d(\lambda)(N \cdot L)I_i(\lambda) + K_s(\lambda)f(\lambda, V, L, N)I_i(\lambda) \quad (6)$$

ここで f は鏡面反射関数で、 λ 、 V 、 L 、 N などに依存する。この関数の設定は Torrance と Sparrow¹⁶⁾ の理論に基づいており、次式のような形で与える。

$$f = \frac{D(\alpha)G(N, V, L)F(\lambda, N, V)}{(N \cdot V)} \quad (7)$$

右辺の 3 種類の関数 D 、 G 、 F は以下の通りである。

まず D は、物体表面を微小な面の集合で構成されているとみなすとき、面の向きを表す分布関数である。これによって H 方向を向いている微小面の割合が定まる。分布関数として法線を中心とする 1 次元の対称関数が仮定される。

関数 G は幾何学的減衰係数である。微小面は傾きを持って分布しているため、隣接する微小面が互いに他を

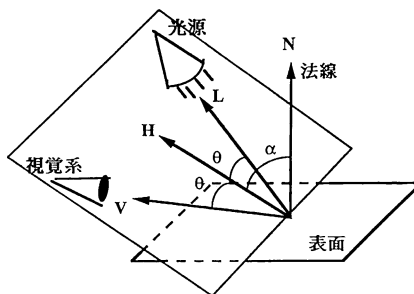


図 7 Blinn モデルのための反射幾何

マスクしたり、光の当たらない陰ができたりする。このような入射光や反射光のさえぎりは当然それらの角度に依存する。

関数 F は微小面の反射率である。反射率が波長に依存して変化したり、また入射角にも依存することも考慮されている。反射率を求めるためにフレネルの式が用いられているが、多数の物理定数が必要になったりして大変複雑である。このために Cook と Torrance は近似解を求める一つの方法を与えている。

4.2 輝度計算

前項の光反射モデルは一つの光源のもとで単一の物体表面を想定していた。現実の世界を模擬するには、3次元空間に複数の物体と複数の光源が存在し、光反射の過程も複雑になる。3次元世界の画像を生成するのにスクリーンを用いる方法がある。レイトレーシング法(光線追跡法)はスクリーンを通して、物体を観測することを想定している(図8参照)¹⁻³⁾。この方法は視線探索法とも呼ばれる。スクリーン上の各画素ごとに、可視の物体面を探索し、その表面の光反射特性に従って、次々と光線を追跡する方法である。見える物体面を探索して輝度計算を行うので、アルゴリズムでは、視線と物体表面の交差判定を行う。交差する面のうちで、最も視点に近いものが観測可能な可視面となる。この操作がスクリーンの全画素について行われる。可視面での輝度は、その物体表面自身の反射による輝度値に、他の物体からの反射の効果が大きければ、その輝度値が加えられる。たとえば、図8で物体2からの反射光が物体1に入射して相互反射することがある。

輝度計算はすべて波長ごとに行う必要がある。物理的単位についていえば、入射光 $I_i(\lambda)$ と反射光 $I_r(\lambda)$ は分光放射輝度に対応する量である。このとき物体表面の反射率はラジアンファクタと呼ばれるものに対応する。輝度計算が蛍光灯のような輝線スペクトルを含む発光にも対応できるようにするには、可視領域 [400, 700] の

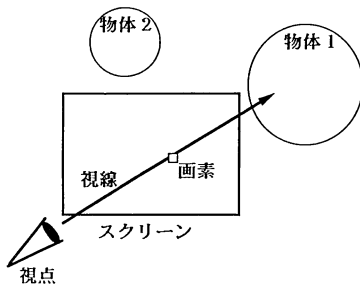


図8 レイトレーシングの概念

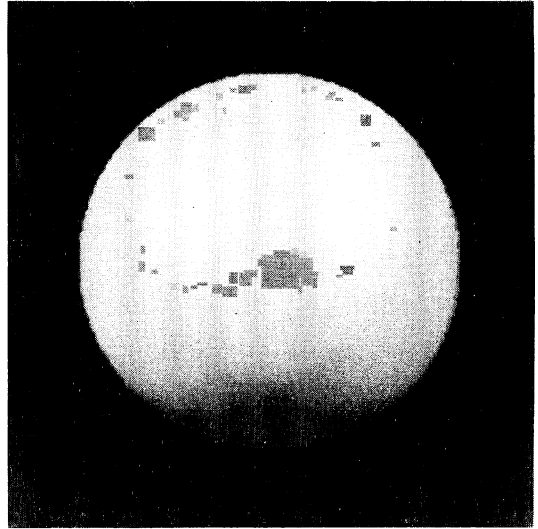


図9 プラスチック球の画像出力結果

5 nm おきに算出する必要がある。この場合、各画素につきスペクトルデータが 61 次元ベクトルとして求まることになる。3原色 RGB のみの輝度計算であれば 3 次元データであることから、計算量はずいぶん大きいといえる。

輝度計算の最後に、物体色の色刺激値を得るために 3 刺激値 XYZ を算出する。以上のようにしてスクリーンの各画素について 3 刺激値が求まり、この値でモニター上にリアルな画像が表示されることになる。

4.3 応用例

図9に画像の出力例を示す。物体はプラスチックの球を想定している。表面は緑で、これには実際にプラスチックを計測して得た分光反射率データを使用した。照明光は二つで、左、右 45 度上方より対角線にそって照射している。両方とも点光源で、左側は蛍光灯、右側はタングステン・ハロゲンランプである。これらのスペクトルも実際の計測データを使用した。また、全体を一樣に照明する環境光としては太陽光を使用した。光反射モデルとして Phong のモデルを採用し、画像の分解サイズは 256×256 画素である。

5. おわりに

物体の忠実でリアルな画像を表示したいという要望はますます高まってきている。本稿では物体の形状よりも、むしろ物体の色の忠実な再現の方法を述べた。物体色の表現は、単に色刺激値をディスプレイ装置から出力するだけでは不十分で、物体の表面状態やそこでの光反射を計算で模擬する必要がある。この点で光反射モデル

は重要な役割を演ずる。

物体色をモニターから正しく出力させるための過程は2段階に分かれる。第1段階はハード面に関係しており、ディスプレイ装置の校正で、正しい色刺激値を出力させるためである。第2段階はソフト面に関係しており、画像を生成させるためのCGアルゴリズムの開発である。レイトレーシングのアルゴリズムが利用できる。分光計算に基づいた画像生成はやはり自然現象に忠実といえる。並列化などによる処理時間の短縮が今後期待される。

文 献

- 1) 中前栄八郎, 西田友是: 3次元コンピュータグラフィックス (昭晃堂, 1986).
- 2) A. Watt: *Fundamentals of Three-dimensional Computer Graphics* (Addison-Wesley, 1989).
- 3) P. Burger and D. Gillies: *Interactive Computer Graphics* (Addison-Wesley, 1989).
- 4) A. Takagi, H. Takaoka, T. Oshima and Y. Ogata: "Accurate rendering technique based on colorimetric conception," *Comput. Graphics*, **24** (1990) 263-272.
- 5) W. B. Cowan: "An inexpensive scheme for calibration of a colour monitor in terms of CIE standard coordinates," *Comput. Graphics*, **17** (1983) 315-321.
- 6) 田島譲二: "カラー画像表示アルゴリズム", *情報処理*, **27** (1986) 11-20.
- 7) 納谷嘉信: 産業色彩学 (朝倉書店, 1980).
- 8) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 1980).
- 9) 富永昌治: "CRT 上への物体色のリアルな表示について", 第24回光学五学会関西支部連合講演会予稿集 (1991) pp. 44-59.
- 10) R. Hall: *Illumination and Color in Computer Generated Imagery* (Springer-Verlag, 1989).
- 11) B. T. Phong: "Illumination for computer-generated pictures," *Commun. ACM*, **18** (1975) 311-317.
- 12) S. Tominaga and B. A. Wandell: "The standard surface reflectance model and illuminant estimation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 576-584.
- 13) 富永昌治: "物体のカラー反射モデルの検討", *情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告*, **59** (1989) 1-8.
- 14) J. F. Blinn: "Model of light reflection for computer synthesized picture," *Comput. Graphics*, **11** (1977) 192-198.
- 15) R. L. Cook and K. E. Torrance: "A reflection model for computer graphics," *Comput. Graphics*, **15** (1981) 307-315.
- 16) K. E. Torrance and E. M. Sparrow: "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces," *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 1105-1114.