

反射光解析に基づく織布の微視的幾何構造の推定

武田祐樹†

坂口嘉之‡

田中弘美†

† 立命館大学 情報理工学部 ‡ デジタルファッション株式会社

能装束は特別な糸で織られた織布であり、貴重な文化遺産である。能装束のデジタルアーカイブ化のために、形状の取得・色再現が考えられる。我々は、能装束の光沢を忠実に再現するために、高精度に反射光を生成する手法を提案する。本論文では、織布の反射光解析に基づき、織布表面の微視的幾何構造を推定する。我々は、織布の微視的幾何構造に注目し、凸幾何構造による陰影(Shadowing/Masking)のモデル化し、Cook-Torranceモデルに適用する。実測の反射光データから微視的幾何構造を推定し、その幾何構造により生成したBRDFと、実測したBRDFの比較実験を行い、本手法の有効性を確かめる。

Estimating the Micro Facet Geometry of Woven Fabrics based on the Reflectance

Yuki Takeda†

Yoshiyuki Sakaguchi‡

Hiromi T. Tanaka†

† College of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

‡ Digital Fashion Ltd.

We estimate the microfacet geometry of woven fabrics based on reflection to generate the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). We consider the relationship between the surface model of woven fabrics and masking. We apply our masking model to Cook-Torrance model to generate the BRDF. The estimated reflectance generated from our model compare with the measured reflectance. The experimental result shows the effectiveness of our model.

1. まえがき

最近ではコンピュータグラフィクス(CG)・コンピュータビジョン(CV)研究による3次元視覚情報処理技術の進展により、貴重な文化財や文化遺産のデジタル記録・保存、デジタルアーカイブ化・コンテンツ化の研究が精力的に進められている。博物館等の所蔵する資料や文化財には、能装束や衣装等の様な布物体が存在する。素材に固有の布物体の変形、光沢や質感は独特であり、これを忠実に再現することがCGやCVにおける重要な課題である。

物体表面の反射特性は、任意の光源からの入射光と任意の視方向への反射光の比率として、双方向反射分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)[3]により記述される。Ashikhminらは、布地の微視的幾何構造(micro facet geometry)を基にした布の異方性反射を表すBRDFを生成し、布表面の微視的幾何構造から反射特性を求め、サテンやベルベットをモデル化しレンダリングした結果を報告している[1]。また、Yangらは、糸断面の凸形状による陰影(Shadowing/Masking)を3つのパラメータでモデル化し高精度のBRDFを生成する手法[9]を提案している。しかし、画像計測から自動的にそれらのパラメータを抽出する方法は提案されていない。

一方、竹村らは全方位型の光学異方性測定装置を開発し、多数の入射方向と視方向の組み合わせによる計測データからBRDFを獲得し可視化する方法を提案した[8]。また、NganらはAshikhminの反射モデル[1]を用い、BRDF計測データから対象物体の微視的幾何構造を抽出する方法を提案した[4]。しかし、いずれの手法も高精度のBRDFを獲得するためには、膨大な数の計測データを必要としている。

我々は、織布の微視的幾何構造に注目し、凸幾何構造による陰影(Shadowing/Masking)を4つのパラメータでモデル化し、Cook-Torranceモデル[2]に適用する。実測の反射光データからパラメータを決定し、推定された幾何構造から生成したBRDFと、実測したBRDFの比較実験を行い、本手法の有効性を確かめる。

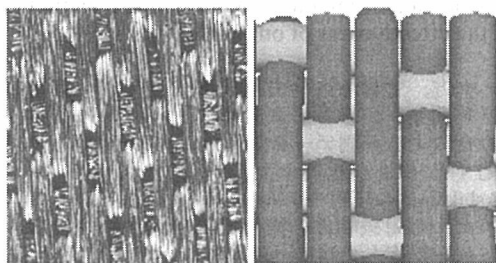
2. 織布の幾何構造

布地の最小構成単位は繊維(fiber)で、一般に、繊維は太さに対して十分な長さをもつ。繊維を数十から数百本集めて束にした一本を単位糸または単糸(unit string)という。絹やナイロンなどの長い繊維は撚りがかけられずに、繊維がほぼ並行に並んでいるものが多く、これをフィラメント糸(filament string)という。一方、木綿などの短い繊維は撚りをかけて、繊維と繊維をつなぐ事により、長い糸を構成する。これをスパン糸

(spun string)という。単糸が一本または数本集まり、一般に呼ばれる糸(string)となる。布の織り方は様々であるが、縦横一本ずつの糸を交互に織り重ねたものを平織り、縦糸または横糸が表面に多く出ているものを、朱子織り(サテン)という。

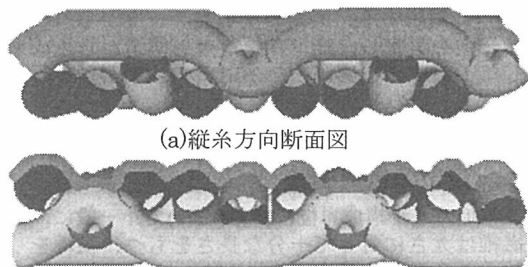
本論文においては、図 1(a)に示すように、シルクライクな無彩色(黒色)のポリエステルサテンを対象織布とする。これは撚りがかかっていないフィラメント糸の断面が三角形状で、且つ朱子織りであるため、縦糸横糸の直交二軸性に基づく布の微視的幾何構造の要因が明らかであり、安定に画像計測できることが期待されるためである。

図 1(b)には、尾張繊維技術センターの織物構造シミュレーションソフト[5]で生成したサテンの織り構造を示す。ただし、糸の形状は円柱と仮定している。図 2 には、縦糸・横糸方向の布地構造の断面図を示す。図 2(a)の縦糸方向の断面図から、表面の法線はほぼ鉛直方向に分布していることが分かる。一方、図 2(b)の横糸方向の断面図から、表面が円形状の集まりと考えられ、法線は方向に寄らずほぼ一定に分布すると考えられる。



(a) 顕微鏡写真 (b) シミュレーション

図 1: ポリエステルサテンの織り構造



(a) 縦糸方向断面図

(b) 横糸方向断面図

図 2: 織り方向の違いによる断面形状

3. 反射特性

まず、本論文で用いる織布の双方向反射分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)を定義する。次に、本手法で用いる Cook-Torrance モデルを紹介し、BRDF 計測を行う実験環境について述べる。

3.1 双方向反射分布関数

物体表面の反射特性は、任意の光源からの入射光と任意の視方向への反射光の比率として、双方向反射分布関数(BRDF)[3]により記述される。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = \frac{L_r(\theta_r, \phi_r)}{L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (1)$$

ただし、 $L_i(\theta_i, \phi_i)$ は光源ベクトル L 方向から立体角 $d\omega_i$ で入射した放射照度、 $L_r(\theta_r, \phi_r)$ は視点ベクトル V 方向に反射される放射輝度である。図 3 に、本論文で用いる BRDF 幾何関係を示す。X 軸は横糸方向、Y 軸は縦糸方向、Z 軸は布の法線方向、 N は法線ベクトル、 R は正反射ベクトルである。入射角 θ_i は N と L のなす角、入射方位角 ϕ_i は XY 平面上で X 軸から L の角度、入射方向は (θ_i, ϕ_i) 、視角 θ_r は N と V のなす角、視方位角 ϕ_r は XY 平面上で X 軸から V の角度、視方向は (θ_r, ϕ_r) である。また、 L と N が作る平面を入射面、 L と V の平均ベクトルをハーフベクトル H と呼ぶ。

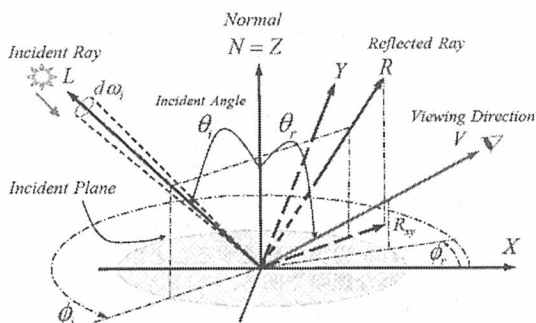


図 3: BRDF 幾何

3.2 Cook-Torrance モデル

Cook ら[2]は、物体表面の微小面分布を基に鏡面反射 ρ_s を表現するモデルを提案した。

$$\rho_s = \frac{DGF}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (2)$$

ただし、 D は微小面分布、 G は陰影 (Shadowing/Masking) を表す幾何減衰、 F はフレネル項を示す。BRDF は 2 色性反射モデル[7]に

従い、拡散反射 ρ_d に Lambert モデルを適用し、以下のように示された。

$$\rho_{bd} = k_s \rho_s + k_d \rho_d \quad (3)$$

$$= k_s \frac{DGS}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + k_d \cos \theta_i \quad (4)$$

我々は Cook-Torrance モデルの鏡面反射を決定するために、織布の D 、及び G を導出する。また、拡散反射も織布の微小面幾何構造に基づいた反射モデルを提案する。

3.3 全方位型光学異方性反射特性測定装置

図 4 に、本論文の実験で使用した全方位型光学異方性反射特性測定装置 (OGM: Optical Gyro Measuring Machine) を示す。画像計測には解像度 2272×1704 ピクセル、有効画素数約 400 万画素のデジタルカメラ Canon PowerShot S40 を使用した。光源にはメタルハライドランプ 180W(外部調光機能付) の LS-M180FB を使用した。OGM は、光源 2 軸、カメラ 1 軸、ステージ 1 軸、合計 4 軸の回転自由度を持つ。これらの自由度を組み合わせることにより、対象物に対しあらゆる入射方向、視方向からの計測が可能である。測定は環境光を取り除くために暗室にて行う。また、撮影した画像の中心 16×16 ピクセル領域の平均輝度値を反射光とした。

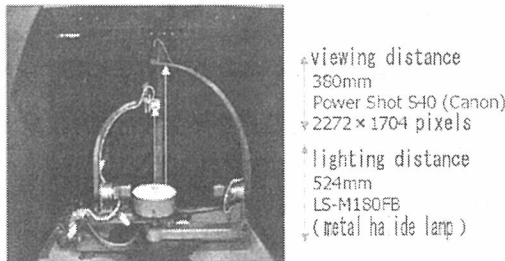


図 4: 全方位型光学異方性測定装置 OGM

3.4 能装束撮影

図 4 の OGM を用い撮影した能装束の断片を図 5 に示す。オレンジ布に金糸が織り込まれており、さらに青、緑、白、赤色の糸で花や葉の刺繍が施されている。能装束の反射光を計測するには、それぞれの色の糸に対し BRDF を獲得する必要がある。撮影画像から色ごとに領域分割を行い各領域で BRDF の獲得・生成を行う。本論文では、単一領域での反射光計測に基づき、高精度な BRDF を生成する手法を提案する。

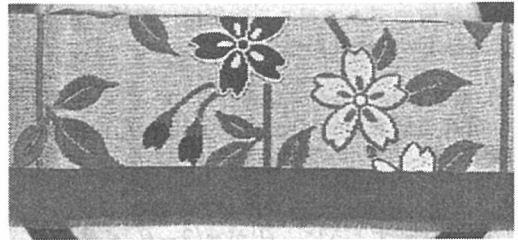


図 5: 能装束の断片

4. 織り糸表面で起こる反射と陰影

織布断面における表面形状を定義する。次に、表面形状モデルにおける陰影をモデル化し、Cook-Torrance モデルを用い、鏡面反射を導く。また拡散反射にも陰影を考慮し、モデル化を行う。

4.1 織布の表面形状モデル

Yang ら[8]は、織布の表面形状モデルから陰影をモデル化した。しかし、表面形状モデルは平織りだけを考慮しており、一般的な織布の構造を表現するものではない。一方我々は、サテンの表面形状に注目し、表面形状を近似した。図 6 に提案する織布の表面形状モデルを示す。Yang らの表面形状モデルには長さ l の辺が存在しない。しかし、図 2(a)を見れば、サテンの縦糸方向断面における表面形状を表現するためには長さ l の辺が必要である。なお、 l の長さを変えることにより、平織り・綾織り・サテンの縦糸方向断面における表面形状が表現できる。

我々の提案する織布の表面形状モデルは円柱の糸で織られた布の表面を近似している。しかし、本来糸は繊維が複数本束ねられ、よられているため、糸表面は滑らかでない。ゆえに、糸表面の微小面分布は方向によらず一定にはならない。よって、微小面分布 D は法線の傾きにより一定値をとらない。最適な D は実験で決定する。

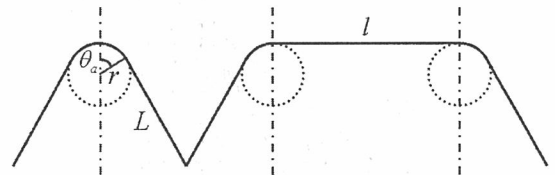


図 6: 表面幾何モデル

4.2 表面形状モデルにおける陰影

凸表面における陰影を考える。ただし、光源入射方向は物体に対し、鉛直方向であると仮定する。微小面に入射する光が遮られず、Shadowing が起こらないためである。提案する

表面幾何モデルで起こる陰影は、視線の傾きにより以下の3通りが考えられる。

① 陰影が起こらない場合

視線の傾き θ_r が $0 \leq \theta_r < \pi/2 - \theta_a$ の場合、陰影は起こらないため、 $G=1$ である。

② 斜面の直線上で陰影が起こる場合

図7に示すように、 θ_r が $\pi/2 - \theta_a \leq \theta_r < \theta_L$ の場合、主に直線上で陰影が起こる。この陰影を G_L とする。ただし、 θ_L は、直線上の陰影の長さ L_M が $L_M = L$ となる視線の傾きである。

③ 円弧上で陰影が起こる場合

図8に示すように、 θ_r が $\theta_L \leq \theta_r \leq \pi/2$ の場合、円弧上で陰影が起こる。この陰影を G_R とする。

以上より、陰影は

$$G = \begin{cases} 1 & (0 \leq \theta_r < \pi/2 - \theta_a) \\ G_L & (\pi/2 - \theta_a \leq \theta_r < \theta_L) \\ G_R & (\theta_L \leq \theta_r \leq \pi/2) \end{cases} \quad (5)$$

ただし、

$$G_L = \frac{2(L - L_M) + 2R + 2R' + l}{4L + 4R + l} \quad (6)$$

$$G_R = \frac{2R_v + 2R' + l}{4L + 4R + l} \quad (7)$$

である。なお、式(6)、(7)における L_M, R', R_v を求める過程は、付録に示す。

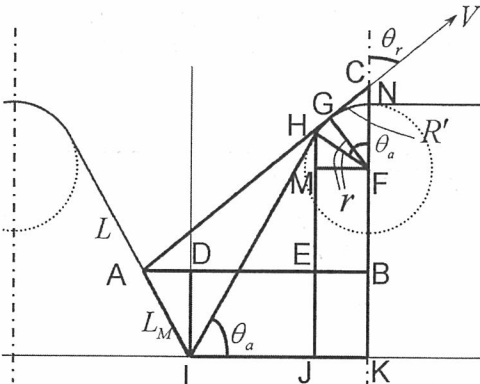


図7：斜面の直線上で陰影が起こる場合

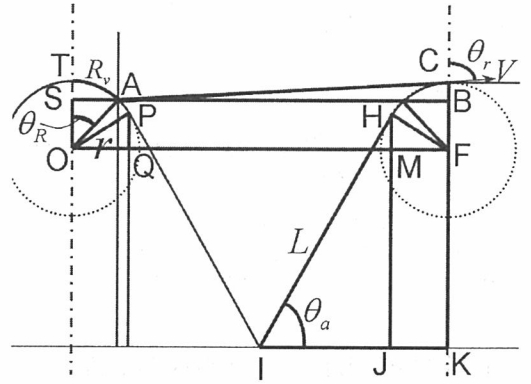


図8：円弧上で陰影が起こる場合

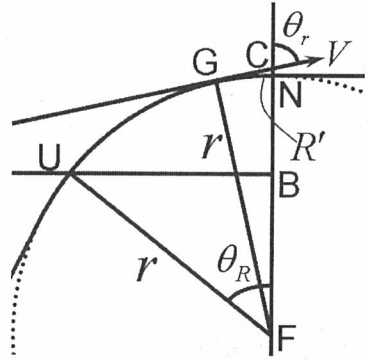


図9：円弧上で陰影が起こる場合(拡大図)

4.3 凸表面における陰影を考慮した拡散反射

従来、拡散反射を表現するために Lambert モデルが採用されてきた。我々は、微小面上で起こる反射は正反射および、方向に寄らず均一に拡散する反射と考えた。よって、拡散反射 ρ_d は以下のように表せる。

$$\rho_d = dG \quad (8)$$

ただし、 d は任意の係数とする。

4.4 織布の BRDF

我々が提案する BRDF は以下である。

$$\rho_{bd}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i) = k_s \frac{DGF}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + k_d dG \quad (9)$$

ただし、入射方向は (θ_i, ϕ_i) 、視方向は (θ_r, ϕ_r) である。 D は微小面分布、 G は陰影 (Shadowing/Masking) を表す幾何減衰、 F はフレネル項を示す。

5. 実験結果

ポリエステルサテン布を対象布とし、実測した反射光データと本手法の比較評価を行う。反射光データは入射方向を布の法線方向とし、視点方向を縦糸方向において視点角度 θ_v を 0 度から 87 度まで 3 度ずつずらし反射光を獲得した。式(9)において、微小面分布 D を

$$D = \exp(-\theta_h^2 / a^2) \quad (10)$$

とする。ただし、 θ_h は法線 N とハーフベクトル H がなす角度である。Fresnel 効果は Schlick ら[6]が提案した以下の式を用いる。

$$F = f_0 + (1 - f_0)(1 - H \cdot V)^5 \quad (11)$$

ただし、 f_0 は屈折率である。

図 10 に提案手法に対し最小二乗フィッティングによるパラメータ決定をしたものと、実測反射光データの比較を示す。決定したパラメータの値は、

$$\theta_a = 48^\circ, r = 224, L = 1259, l = 672, k_s = 0.56 \\ k_d = 0.44, d = 0.11, a = 7.7, f_0 = 0.36$$

である。ただし、対象織布がサテンであることから $l = 3r$ とした。実験結果から、鏡面反射は θ_r が約 42 度まで、それ以上の角度では拡散反射であると考えられる。実測した反射光の拡散反射が θ_r によらず一定でないことから、Lambert モデルには従わないことを示している。また、推定したデータが実測から得られたデータと一致していることから本手法が有効であると考えられる。

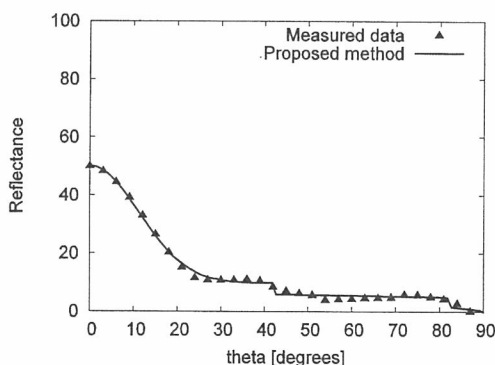


図 10：提案手法と実測データの比較

6. あとがき

我々は、織布の微視的幾何構造に注目し、凸幾何構造による陰影(Shadowing/Masking)を 4 つのパラメータでモデル化した。Cook-Torrance モデルに我々の陰影モデルを適用し、実測の反射

光データからパラメータを決定した。推定された幾何構造から生成した BRDF と、実測した BRDF の比較実験を行い、本手法の有効性を確かめた。今後、全織り方向に対し微視的幾何構造及び、陰影の解析を行う。

参考文献

- [1] Michael Ashikhmin, Simon Premoze, Pete Shirley, "A Microfacet-based BRDF Generator", Proc. ACM SIGGRAPH 2000, pp.65-74, 2000.
- [2] R. L. Cook and K. E. Torrance, "A reflectance models for computer graphics," Computer Graphics, vol.15, No.3, pp.307-316, 1981.
- [3] N. Nicodemus, J. Richmond and J. Hsia, "Geometrical considerations and nomenclature for reflectance", tech. rep., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1997.
- [4] A. Ngan, F. Durand and W. Matusik, "Experimental Analysis of BRDF Models", Proc. Eurographics Symposium on Rendering, pp.117-226, 2005.
- [5] 太田幸一, 池口達治, "織物内部構造の 3 次元モデル化", 繊維機械学会誌, Vol.57, No.8, 2004
- [6] C. Schlick, "An inexpensive BRDF model for physically-based rendering," Computer Graphics Forum, vol.13, No.3, pp.233-246, June 1994.
- [7] S. A. Shafer, "Using color to separate reflection components," Color Research and Application, vol.10, No.4, pp.210-218, 1985.
- [8] 竹村伸太郎, 坂口嘉之, 三ツ井茂, 国松敦, 山内康晋, 千原国広, "異方性反射特性の測定と可視化手法の提案", 計測自動制御学会, 第 7 回パターン計測シンポジウム, 2002
- [9] Jinhua Yang and Katsushi Ikeuchi, "A Rendering Method for Woven Clothes Reflections," Proc. Computer Vision and Image Media, Vol.2003, No.140, pp.33-40, 2003

付録

以下に、式(6), (7)における L_M, R', R_v を求める過程を示す。

図 7 に、陰影②の場合を示す。

$\triangle ABC$ において、 $\angle ACB = \theta_r$ より

$$\tan \theta_r = AB/BC \quad (12)$$

である。また、

$$AB = AD + DE + EB \quad (13)$$

である。

$\triangle ADI$ において、 $AI = L_M$, $\angle DAI = \theta_a$ より

$$AD = L_M \cos \theta_a \quad (14)$$

である。

$\triangle HIJ$ において、 $HI = L$, $\angle HIJ = \theta_a$ より

$$IJ = L \cos \theta_a = DE \quad (15)$$

である。

$\triangle FHM$ において、 $FH = r$, $\angle FHM = \theta_a$ より、

$$FM = r \sin \theta_a = EB \quad (16)$$

である。よって式(13), (14), (15), (16)より,

$$AB = L_M \cos \theta_a + L \cos \theta_a + r \sin \theta_a \quad (17)$$

である。

一方, $\triangle HIJ$ において, $HI = L$, $\angle HIJ = \theta_a$ より

$$HJ = L \sin \theta_a \quad (18)$$

である。

$\triangle ADI$ において, $AI = L_M$, $\angle DAI = \theta_a$ より

$$DI = L_M \sin \theta_a = EJ \quad (19)$$

である。

$\triangle FHM$ において, $FH = r$, $\angle FHM = \theta_a$ より,

$$HM = r \cos \theta_a \quad (20)$$

である。

また,

$$EM = HJ - EJ - HM = FB \quad (21)$$

である。

$\triangle CFH$ において, $FH = r$, $\angle FCH = \theta_r$ より,

$$CF = r / \sin \theta_r \quad (22)$$

である。従って, 式(18), (19), (20), (21), (22)より,

$$\begin{aligned} BC &= CF + FB \\ &= r / \sin \theta_r + L \sin \theta_a - L_M \sin \theta_a - r \cos \theta_a \end{aligned} \quad (23)$$

である。以上より,

$$L_M = \frac{r(1/\cos \theta_r - \cos \theta_a \tan \theta_r - \sin \theta_a) + L(\sin \theta_a - \cos \theta_a)}{\sin \theta_a \tan \theta_r + \cos \theta_a} \quad (24)$$

である。

また, $\triangle CFG$ において $\angle CFG = \pi/2 - \theta_r$ より,

$$R' = r(\pi/2 - \theta_r) \quad (25)$$

である。

図 8, 9 に陰影③の場合を示す。

$\triangle ABC$ において, $\angle ACB = \theta_r$ より

$$\tan \theta_r = AB/BC \quad (26)$$

である。また,

$$AB = SB - SA \quad (27)$$

である。

$\triangle AOS$ において, $\angle AOS = \theta_R$ とすると

$$SA = r \sin \theta_R \quad (28)$$

である。また,

$$SB = 2IK \quad (29)$$

であり, 式(15), (16), (29), $JK = FM$ より

$$SB = 2(r \sin \theta_a + L \cos \theta_a) \quad (30)$$

である。よって, 式(27), (28), (29)より

$$AB = 2(r \sin \theta_a + L \cos \theta_a) - r \sin \theta_R \quad (31)$$

である。

次に $\triangle BFU$ において, $\angle BFU = \theta_R$ より

$$BF = r \cos \theta_R \quad (32)$$

である。

ゆえに, 式(22), (32), $BC = CF - BF$ より

$$BC = r / \sin \theta_r - r \cos \theta_R \quad (33)$$

である。

以上より,

$$\theta_R = \arcsin \left(2 \sin \theta_a \cos \theta_r + \frac{2L}{r} \cos \theta_a \cos \theta_r - 1 \right) + \theta_r \quad (34)$$

$$R_v = r \theta_R \quad (35)$$

である。