

複数の魚眼カメラを用いた俯瞰画像生成手法の構築

A Method to Construct Overhead View Images Using Multiple Fish-Eye Cameras

加瀬 翔太 (中央大) 学 光本 尚訓 (中央大) 新垣 洋平 (日産) 下村 倫子 (日産) 正 梅田 和昇 (中央大)

Shota KASE, Chuo University, kase@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Hisanori MITSUMOTO, Chuo University, mitumo@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Yohei ARAGAKI, Nissan Motor Co., Ltd., aragaki@mail.nissan.co.jp

Noriko SHIMOMURA, Nissan Motor Co., Ltd., n-shimomura@mail.nissan.co.jp

Kazunori UMEDA, Chuo University, umeda@mech.chuo-u.ac.jp

In recent years, active safety technologies of cars are becoming important. And the chance that cameras are mounted in cars is increasing. Since the perception of the distance of a usual image is difficult, technologies to construct overhead view images and assist drivers are proposed. In this paper, we propose methods for estimating camera parameters of multiple cameras and construct overhead view images with small errs. Effectiveness of methods is examined by experiments.

Key Words: overhead view images, fish-eye camera, calibration

1 緒言

近年、ドライバーの安全確認を支援する車載カメラシステムが普及してきている。通常の車載カメラ画像では距離感の知覚が難しいこともあり、車両を真上から見たような画像(俯瞰画像)に変換し、安全確認を補助する技術が提案されている [1]。さらに俯瞰画像を合成することで、車両の全周を容易に観測することを可能とするシステムも知られている [2, 3]。複数台のカメラを用いて、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成するためには、それぞれのカメラの外部パラメータである位置・姿勢を正しく算出することが重要である。また、カメラ台数を減らして生産コストを低減するために、超広角の魚眼カメラを用いることは有効である。しかし、通常のピンホールカメラの内部パラメータ推定に関する研究 [4, 5] は多く行われているのに対して、魚眼カメラの内部パラメータ推定に関する研究 [6-8] は少なく、安定性、精度の面でも劣る。そのため、魚眼カメラの内部パラメータ推定も重要である。本研究では、複数魚眼カメラの外部パラメータと内部パラメータを推定し、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成する手法を提案する。

2 魚眼カメラの概要

2.1 射影方式

魚眼レンズの射影方式は、シーンからレンズへの投射線がレンズの光軸となす角 θ と、画像上の像高(射影点の光軸からの距離) r_f [pixel] によって、一般に記述される。魚眼レンズは設計によって射影方式が異なるが、代表的なものは以下の二つである。

$$r_f = \delta\theta \text{ (等距離射影)} \quad (1)$$

$$r_f = \delta \sin \theta \text{ (正射影)} \quad (2)$$

これに対して、一般のカメラのモデルである透視投影モデルは、

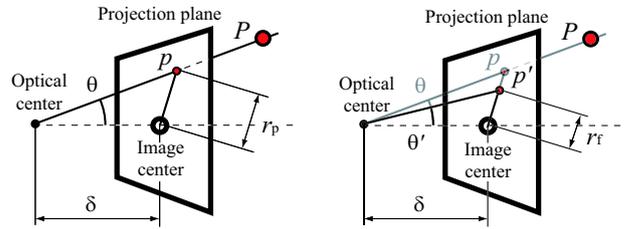
$$r_p = \delta \tan \theta \text{ (透視投影モデル)} \quad (3)$$

$$\delta = f/w, \quad f: \text{焦点距離 [mm]}, \quad w: \text{画素サイズ [mm]}$$

と表せる。

Fig.1 に透視投影モデルと魚眼カメラモデルの投影の違いを示す。透視投影モデルの場合、シーンにおける点 P は、点

P からレンズ中心への投射線が画像平面と交わる点 p に投影される。それに対して、魚眼カメラモデルの場合、シーンにおける点 P は点 p' に投影される。



(a) Perspective projection

(b) Fish-eye

Fig.1 Difference of projection

2.2 魚眼カメラモデル

魚眼レンズの投影は、製造過程で発生する誤差などの影響のために、一般に、理想的な射影方式である式 (1), (2) などのいずれにも従わない。2.2 節では、中野らの報告 [8] に従い、魚眼カメラモデルについて述べる。

2.2.1 放射方向歪曲差

式 (1), (2) で表される一般的な魚眼レンズの射影方式は、投射角 θ に対して線形か、 θ の \sin または \tan 関数で表される。 \sin 関数、 \tan 関数のテイラー展開は θ の奇数乗の項のみとなる。本論文では、このテイラー展開の 5 乗項までを用いて

$$r_f = k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 \quad (4)$$

と近似した式を放射方向歪曲差 (radial distortion) を含む一般の魚眼レンズの射影方式として用いることにする。 k_1, k_3, k_5 はテイラー展開の各項の係数である。

2.2.2 光軸点のずれ

実際のレンズの光軸は、画像中心を通らずに多少ずれている (Shift of optical center)。魚眼カメラから得られた画像 (以下、魚眼画像と呼ぶ) 上のある点の位置を $m_f = [u_f \ v_f]^T$ とする。また、魚眼画像上の光軸点の位置を $c = [c_u \ c_v]^T$ と

する。このとき、 c を原点とした座標系における位置 m_f' と m_f の関係は、

$$m_f' = \begin{bmatrix} u_f' \\ v_f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f - c_u \\ v_f - c_v \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。ここで、 γ は u_f 方向、 v_f 方向の画素サイズの比である。本論文では、一般のカメラの CCD の各画素は正方形であることから、 $\gamma = 1$ とする。式 (5) は、極座標形式では

$$r_f = \sqrt{u_f'^2 + v_f'^2} \quad (6)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{v_f'}{u_f'}\right)$$

と表すことができる。

2.2.3 魚眼カメラの内部パラメータ

魚眼カメラには、上記のひずみ以外に接線方向歪曲収差があることが知られている。しかし一般に接線方向歪曲収差は小さいものなので本論文では取り扱わない。以上から最終的な魚眼カメラモデルは

$$r_f = k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 \quad (7)$$

となる。また、求める魚眼カメラの内部パラメータは

$$I = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ c_u \ c_v]^T \quad (8)$$

と表せる。

3 俯瞰合成画像生成の概要

本章では、魚眼画像から俯瞰合成画像を生成する手法の概要を示す。まず、魚眼画像を透視投影モデルの画像（以下、透視投影画像と呼ぶ）に変換する。次に、透視投影画像を俯瞰画像に変換する。俯瞰画像は、環境を真上から見下ろす位置に設置したと仮定した仮想的なカメラから見た画像である。最後に、異なる複数のカメラから得られた俯瞰画像を合成することにより俯瞰合成画像を生成する。

3.1 透視投影画像への変換

魚眼画像から透視投影画像への変換は、透視投影画像座標系における位置 $m_p = [u_p \ v_p]^T$ と、魚眼画像座標系における位置 $m_f = [u_f \ v_f]^T$ の関係を求めることにより可能である。ここで、透視投影モデルは

$$r_p = \delta_p \tan \theta \quad (9)$$

で表される。また、その像高は

$$r_p = \sqrt{u_p^2 + v_p^2} \quad (10)$$

と表される。式 (9), (10) より、カメラの投影角 θ は

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}}{\delta_p}\right) \equiv \theta(m_p) \quad (11)$$

となり、 m_p の関数となる。更に、光軸点のずれ $c = [c_u \ c_v]^T$ を補正した魚眼画像座標系と透視投影画像座標系におけるそれぞれの方位角 ϕ が等しいことから

$$u_f = \frac{r_f}{r_p} u_p + c_u, \quad v_f = \frac{r_f}{r_p} v_p + c_v \quad (12)$$

が成り立つ。式 (12) に、式 (7), (10), (11) を代入することにより

$$m_f = \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_1\theta(m_p) + k_3\theta(m_p)^3 + k_5\theta(m_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} u_p + c_u \\ \frac{k_1\theta(m_p) + k_3\theta(m_p)^3 + k_5\theta(m_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} v_p + c_v \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\equiv \begin{bmatrix} F_u(m_p, I) \\ F_v(m_p, I) \end{bmatrix}$$

が求まり、 m_f は m_p の関数で表すことができる。

3.2 俯瞰画像への変換

透視投影画像から俯瞰画像への変換は、俯瞰画像座標系における位置 $m_i = [u_i \ v_i]^T$ と、透視投影画像座標系における位置 $m_p = [u_p \ v_p]^T$ の関係を求めることにより可能である。ここで、ワールド座標系の、原点を観測する地表面上に、 Z_w 軸を地表面に垂直な方向にとる。透視投影画像座標系とワールド座標系における位置を同次座標で

$$\tilde{m}_p = [u_p \ v_p \ 1]^T, \quad \tilde{X}_w = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$$

と表記すると、透視投影画像座標系とワールド座標系の関係は、

$$\tilde{m}_p = P_p \tilde{X}_w \quad (14)$$

で表すことができる。この 3×4 行列 P_p は透視投影行列と呼ばれ、カメラの外部パラメータを含んでいる。 P_p の i 列目の成分を p_i とし、投影面が $Z_w = 0$ であることを考慮すると、式 (14) は

$$\tilde{m}_p = P_p \tilde{X}_w = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= [p_1 \ p_2 \ p_4] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H_p \tilde{x}_w$$

となり、 3×3 の行列 H_p を含む形式に変換できる。同様に、俯瞰画像座標系における位置を $\tilde{m}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ とすると

$$\tilde{m}_i = H_i \tilde{x}_w \quad (16)$$

が成り立ち、式 (15), (16) から

$$\tilde{m}_p = H_p H_i^{-1} \tilde{m}_i \quad (17)$$

が求まり、 m_p は m_i の関数で表すことができる。

3.3 俯瞰合成

3.1 節、3.2 節で求まる複数の俯瞰画像は、同一の仮想的なカメラから見た画像である。そのため複数のカメラに写った任意の点は、同一の画素位置で表すことができる。つまり、それぞれの俯瞰画像の画素位置において画素値平均を求めることで、俯瞰合成画像を生成することができる。

4 カメラパラメータの推定

4.1 内部パラメータの推定手法

魚眼カメラの内部パラメータ推定手法には、中野らが提案した、しま模様校正パターンの直線性を利用する手法 [8] を利用する。

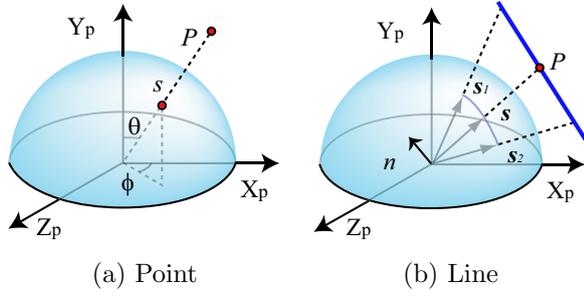


Fig.2 Sphere model

図 2(a) に示すシーンにおける点 P の単位位置ベクトルは、カメラの光学中心を中心とした球にシーンを投影する球面モデルの投射角 θ と方位角 ϕ を用いて

$$\mathbf{s} = [\sin \theta \cos \phi \quad \cos \theta \quad \sin \theta \sin \phi]^T \quad (18)$$

と表される。また、図 2(b) に示す直線上の二点の単位位置ベクトル $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ に直交する単位法線ベクトルを

$$\mathbf{n} = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T \quad (19)$$

と表す。式 (18), (19) から

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{s} = n_x \sin \theta \cos \phi + n_y \cos \theta + n_z \sin \theta \sin \phi = 0 \quad (20)$$

が成り立つ。この方程式を用いた評価関数

$$\xi_i = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{P_l} (\mathbf{n}_l \cdot \mathbf{s}_i)^2 \quad (21)$$

を最小化する内部パラメータ \mathbf{I} を求める。ここで、 L は観測直線の本数、 P_l は l 本目の直線上の点の数である。パラメータの推定には、線形近似による反復改良法である Gauss-Newton 法を用いる。観測点が魚眼画像座標系において $\mathbf{m}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$ と与えられたとき、投射角 θ を式 (7) から Brent 法 [9] で求めて、式 (18) に代入する。こうして投影座標 \mathbf{s}_i を求めることができる。

4.2 外部パラメータの推定手法

外部パラメータは、観測点 P_i の魚眼画像座標系における位置 $\mathbf{m}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$ とワールド座標系における位置 $\mathbf{X}_{wi} = [X_{wi} \ Y_{wi} \ Z_{wi}]^T$ の対応から求めることができる。ワールド座標系におけるカメラの方向を θ_{cam} 、仰角を α_{cam} 、ロール角を β_{cam} とする。また、カメラの位置を $[X_{cam} \ Y_{cam} \ Z_{cam}]^T$ とすると、求めるカメラの位置、姿勢のパラメータは、

$$\mathbf{E} = [X_{cam} \ Y_{cam} \ Z_{cam} \ \theta_{cam} \ \alpha_{cam} \ \beta_{cam}]^T \quad (22)$$

となり、式 (14) の \mathbf{P}_p に含まれる。 \mathbf{X}_{wi} を魚眼画像座標系に逆投影した点を \mathbf{m}_{wi} とすると、式 (13), (14) より

$$\mathbf{m}_{wi} \equiv \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi}) \quad (23)$$

と $\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi}$ の関数で表すことができる。よって評価関数

$$\xi_e = \sum_{i=1}^N \{\mathbf{m}_{fi} - \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi})\}^2 \quad (24)$$

を最小化する \mathbf{E} を求める。 N は観測点数である。パラメータの推定には、Gauss-Newton 法を用いる。この際、初期値は、カメラを設置した際に手動で測定した値を用いる。

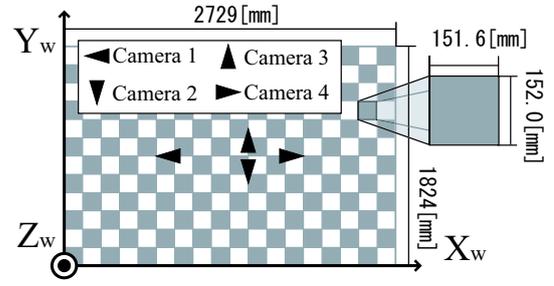
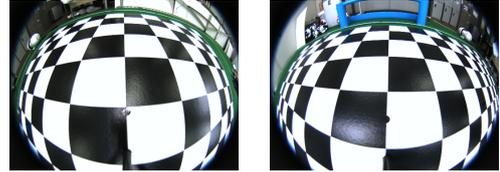


Fig.3 World Coordinate system and camera position



(a) Camera1 (b) Camera2

Fig.4 Fish-eye images

4.3 カメラパラメータの同時最適化

式 (23) は、内部パラメータ \mathbf{I} を含むので

$$\mathbf{m}_{wi} \equiv \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{I}, \mathbf{X}_{wi}) \quad (25)$$

とも表すことができる。4.1 節、4.2 節で求めた内部パラメータ \mathbf{I} 、外部パラメータ \mathbf{E} を初期値として

$$\xi_c = \sum_{i=1}^N \{\mathbf{m}_{fi} - \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{I}, \mathbf{X}_{wi})\}^2 \quad (26)$$

を最小化することで、最適化を行うことができる。

5 俯瞰画像作成実験

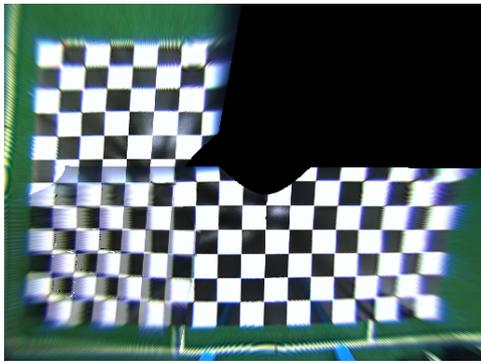
以上で提案した手法を用いて、二ヶ所の異なる位置に設置したカメラから俯瞰合成画像を生成した。また条件を変えて比較を行った。 CCD カメラは Point Grey Research 社の Dragonfly2 を、レンズはスペース社の TV1634M を用いた。 TV1634M の射影方式は正射影である。画像サイズは、512[pixel]×384[pixel] である。校正環境とワールド座標系を図 3 に示す。三角形の鋭角の先端でカメラの位置を、鋭角の向きでカメラの方向 θ_{cam} を表している。 θ_{cam} は、 Y_w 軸の向きを 0[deg] として反時計回りに正の値をとる。いずれの実験でもカメラは $Z_w = 200[\text{mm}]$ の位置に設置した。カメラの外部パラメータを算出する際の観測点の魚眼画像における位置は、チェックパターンの交点であり、これを手動で取得している。

5.1 最適化の評価

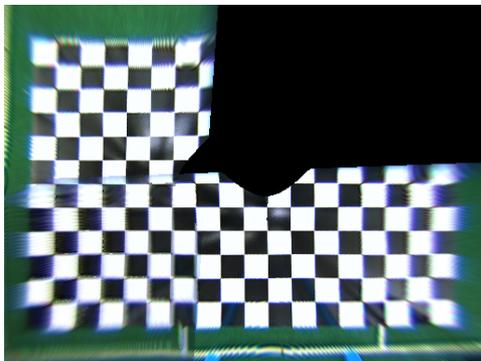
得られた魚眼画像を図 4 に示す。この画像から俯瞰画像を生成し、4.3 節の最適化を行う場合と行わない場合で、それぞれ俯瞰合成画像を生成し比較を行った。カメラの位置は図 3 の Camera1, 2 である。カメラの仰角 α_{cam} は地表面に対して下向きに負の値をとり、 $\alpha_{cam} = -60[\text{deg}]$ とする。またロール角 $\beta_{cam} = 0[\text{deg}]$ とする。最適化前の画像を図 5 (a) に、最適化後の画像を図 5 (b) に示す。最適化前に比べて最適化後は、二つの画像のずれが小さくなっていることが分かる。以降の実験では、すべて最適化を行うものとする。

5.2 カメラ仰角の違いの評価

二台のカメラの仰角を変化させて、俯瞰合成画像を生成した。このとき、 $\alpha_{cam} = -30[\text{deg}]$ である。その他のカメラの



(a) Without optimization



(b) With optimization

Fig.5 Effect of Optimization

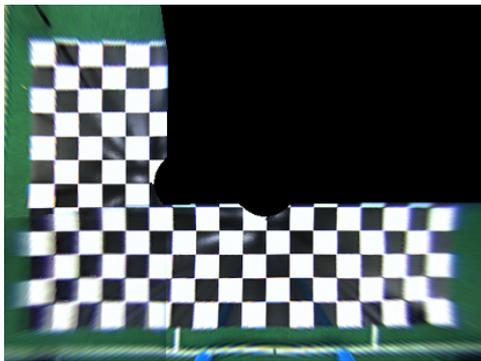


Fig.6 Effect of elevation angle change ($\alpha_{cam} = -30[\text{deg}]$)

位置、姿勢は、5.1節の実験と同じである。図6に結果を示す。角度を変化させた場合も、図5とほぼ同等のずれのない画像を生成することができた。

5.3 レンズの違いの評価

二台のカメラのレンズをフジノン社の FE185C046HA-1 に変更して、俯瞰合成画像を生成した。FE185C046HA-1 の射影方式は、等距離射影である。カメラの位置、姿勢は、5.1節の実験と同じである。図7に結果を示す。異なったレンズを用いた場合も、図5とほぼ同等のずれのない画像を生成することができた。

5.4 全周囲画像の生成

カメラの設置台数を四台にして全周囲画像を生成した。四台のカメラの位置は図3の Camera1~4 で表される。カメラの仰角はすべて $\alpha_{cam} = -60[\text{deg}]$ である。図8に結果を示す。多少のずれはあるものの全周囲の俯瞰合成画像を生成することができた。

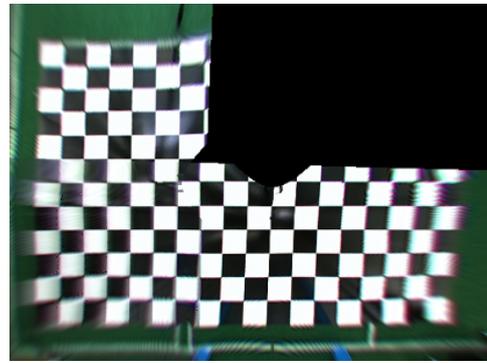


Fig.7 Effect of lens change (lens: FE185C046HA-1)

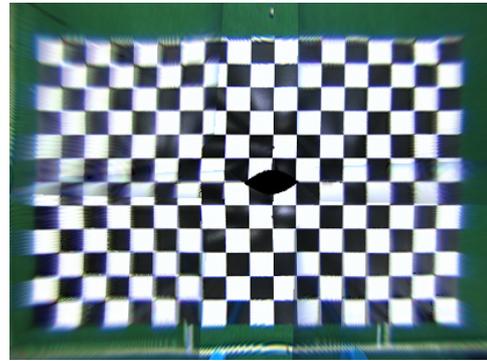


Fig.8 All around veiw

6 結言

魚眼カメラを用いて、カメラパラメータを推定し、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成する手法を提案し、実装した。実験を行い、俯瞰画像の生成手法の有用性を検討した。また実験条件の変化による比較を行った。

今後の展望として、接線方法歪曲収差などのレンズひずみを考慮した俯瞰合成画像生成手法の構築、校正に立体物を使用した場合の俯瞰合成画像の精度評価、俯瞰合成画像のずれやひずみの定量的な評価が挙げられる。

謝辞 実験で用いるレンズを貸与して頂いたフジノン株式会社の粉川博氏に深謝いたします。

文 献

- [1] 浅利圭介, 石井洋平, 本郷仁志, 蚊野浩, “鳥瞰画像生成における校正環境の簡易化,” 第13回画像センシングシンポジウム予稿集 (2007) IN1-13.
- [2] K. Oizumi, “Development of “All-Around View” System,” Sae Technical Paper Series (2003).
- [3] 鈴木政康, 知野見聡, 高野照久, “俯瞰ビューシステムの開発,” 自動車技術学会学術講演会前刷集, 116-07 (2007) pp.17-22.
- [4] 松山隆司など共著, “コンピュータービジョン,” 新技術コミュニケーションズ, 東京 (1999) pp.37-48.
- [5] Z. Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22 No.11 (2000) pp.1330-1334.
- [6] 駒形英樹 他, “魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法,” 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J89-D-II, No.1 (2006) pp.64-73.
- [7] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂, “球面画像獲得のための魚眼カメラの校正,” 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J88-D-II, No.9 (2005) pp.1847-1856.
- [8] 中野誠士, 李仕剛, 千葉則茂, “球面モデルに基づくしま模様パターンを用いた魚眼カメラの校正,” 電子情報通信学会論文誌, D Vol.J90-D, No.1 (2007) pp.73-82.
- [9] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T.Vetterling, and B.P. Flanery (著), 丹廣勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠 (訳), “Numerical Recipes in C,” 技術評論社, 東京 (1993) pp.261-264.