

高橋, 森の数値積分理論の FFT による実現†

孫 春 蘭** 鳥 居 達 生***

高橋, 森は複素関数論の立場から各種の数値積分公式を統一的に導き, それらの公式の誤差評価を行う理論を提案した. この理論では, 重み関数 $w(x)$ を含む区間 (a, b) 上の関数 $f(x)$ の定積分を対象とする. 区間 (a, b) と重み関数 $w(x)$ だけに依存し, $[a, b]$ を除く複素平面全体で正則な積分の定義関数を導入する. その有理関数近似の仕方によって, さまざまな数値積分公式が得られる. われわれは, この理論に基づいて数値積分公式を統一的, 自動的に求める手法の開発を行った. このとき, 積分の定義関数を有理関数近似するために, FFT を有効に利用する.

1. はじめに

有限区間 $J=(a, b)$ 上の積分

$$I = \int_a^b f(x)w(x)dx \quad (1.1)$$

を考える. $w(x)$ は重み関数で, 次の条件を満足しているものとする.

(1) $w(x)$ は $J=(a, b)$ で連続で, 有限個の点で 0 になることを除いて $w(x) > 0$ である.

(2) $\int_a^b x^k w(x)dx = M_k < \infty$, ($k=0, 1, 2, \dots$).

被積分関数 $f(x)$ は複素平面上の関数とし, 実軸上の区間 $J=(a, b)$ 上で正則な関数である.

コーシーの積分表示

$$f(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_c \frac{f(z)}{z-x} dz \quad (1.2)$$

を用いることにより, 定積分 I は次のように周回積分の形に表すことができる.

$$I = \frac{1}{2\pi i} \int_c \Psi(z)f(z)dz \quad (1.3)$$

$$\Psi(z) = \int_a^b \frac{w(x)}{z-x} dx \quad (1.4)$$

ここで, $\Psi(z)$ を $w(x)$ に関する積分 I の定義関数と高橋, 森は命名した^{1), 2)}. J を囲む閉曲線 C は, その内部に $f(z)$ の特異点は含まないものとする (図 1).

ここに現れる関数 $\Psi(z)$ は, 以下の性質を持つことが知られている.

(1) 積分区間 $J=(a, b)$ およびその端点を除いて

全平面で正則な関数である.

(2) 区間 J および重み $w(x)$ にのみ依存し, 被積分関数 $f(x)$ にはまったく関係しない関数である.

(3) $|z| \rightarrow \infty$ のとき, $\Psi(z) = O(z^{-1})$ の条件によって, $\Psi(z)$ の形は一意的に定められる^{1), 2)}.

数値積分公式は, 通常, 次のような関数値の線形和で表現する.

$$I_n = \sum_{j=1}^n A_j f(a_j) \quad (1.5)$$

a_j を積分の標本点, A_j を重み係数という. 標本点数が n 個のとき, この公式を n 点公式と呼ぶ.

上式も周回積分の形に表すことができる.

$$I_n = \frac{1}{2\pi i} \int_c \Psi_n(z)f(z)dz \quad (1.6)$$

$$\Psi_n(z) = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{z-a_j} = \frac{G_n(z)}{F_n(z)} \quad (1.7)$$

ただし, $F_n(z) = \prod_{j=1}^n (z-a_j)$ は n 次, $G_n(z)$ はたかだか $n-1$ 次の多項式である.

明らかに, $\Psi(z)$ の有理関数近似をどう構成するかによって, 様々な数値積分公式を創出することができる.

数値積分 I_n の誤差 ΔI_n は

$$\Delta I_n = I - I_n = \frac{1}{2\pi i} \int_c \Phi_n(z)f(z)dz \quad (1.8)$$

$$\Phi_n(z) = \Psi(z) - \Psi_n(z) \quad (1.9)$$

と表される. ここで, $\Phi_n(z)$ を数値積分公式の誤差の特性関数という^{1), 2)}.

n 点公式 (1.5) が m 次の公式ならば, $\Phi_n(z)$ は無限遠点の近傍で

$$|\Phi_n(z)| = O(z^{-m-2}) \quad (|z| \rightarrow \infty) \quad (1.10)$$

のように振舞う.

高橋, 森の論文²⁾ は, 各種の数値積分の誤差評価に重点があるが, われわれは, この理論に基づいて,

† The Realization of Takahashi and Mori's Numerical Integration Theory by Means of FFT by CHUN-LAN SUN (System Engineering Operation, MEITEC Corporation Limited) and TATSUO TORII (Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya University).

** (株)メイテックシステム事業部技術部

*** 名古屋大学工学部情報工学科

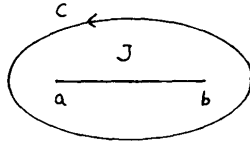


図 1 積分路 c
Fig. 1 Path of integration (1.3).

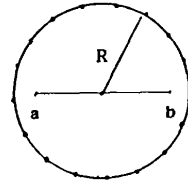


図 2 FFT の標本点
Fig. 2 Sample points of FFT.

FFT を用い, 各種の数値積分公式を統一的に導く計算法を提案する. 本方法は単に数値積分法だけでなく, 関数の補間, 数値微分公式の導出に適用できる. また, 微分方程式を選点法によって離散近似するのも役立つ.

2. FFT による積分の定義関数の近似

2.1 円領域の外部で近似する場合

積分の標本点 a_j をあらかじめ指定しておく, 積分公式 (1.5) 中の未知数 A_j を求めることだけが問題となる. A_j は (1.7) 式より有理関数 $G_n(z)/F_n(z)$ の分母の零点の留数であるため, $G_n(z)$ を求めなければならない.

仮定より, $F_n(z)$ は n 次多項式

$$F_n(z) = \prod_{j=1}^n (z - a_j) \tag{2.1}$$

で与えられる. (1.4) 式の $\Psi(z)$ は既知であることに注意し, $\Psi(z)F_n(z)$ を次のように Laurent 級数に展開する. このとき, $\Psi(z)$ の性質 (1) と (3) より, z の正べきの最高次数は $n-1$ でなければならない. すなわち

$$\begin{aligned} \Psi(z)F_n(z) &= c_0 + c_1z + \dots + c_{n-1}z^{n-1} + c_{-1}z^{-1} + \dots \\ &= G_n(z) + \sum_{k=1}^{\infty} c_{-k}z^{-k}. \end{aligned} \tag{2.2}$$

正べきの項が求める $G_n(z)$ である. また, このときの誤差の特性関数は

$$\Phi_n(z) = \frac{1}{F_n(z)} \sum_{k=1}^{\infty} c_{-k}z^{-k} \tag{2.3}$$

で表される.

次に, 係数 c_k の近似値を N 点 FFT によって求める. 簡単のため区間 (a, b) は $(-1, 1)$ とする, $R > 1$ を定めて, $\Psi(z)F_n(z)$ の $Z^N - R^N$ の零点上における補間式を

$$\sum_{k=0}^{n-1} C_k z^k + \sum_{k=1}^{N-n} C_{N-k} z^{-k} \tag{2.4}$$

とおくと, $N \rightarrow \infty$ のとき, 各 C_k は $\Psi(z)F_n(z)$ の Laurent 展開係数に収束する. 係数 C_k は次に述べるように FFT によって求められる. それらは級数 (2.2)

の係数と次の対応関係を持つ³⁾.

$$\begin{aligned} C_0 C_1 \dots C_{n-1} C_n \dots C_{N-1}, \\ c_0 c_1 \dots c_{n-1} c_{-(N-n)} \dots c_{-1}. \end{aligned}$$

以下, FFT によって Laurent 展開係数が得られるとして, これを取り扱う.

- 中心 0, 半径 R の円周上で等間隔に N 個の標本点を取る (図 2).

- 入力関数 $\Psi(z)F_n(z)$ を標本点上で標本化する.

- N 点複素数型 FFT のルーチンを利用する. 通常, N は 2 のべきである.

以上のことから, FFT の都合によって, 積分の定義関数の近似は円領域の外部で行うことになる.

次に, 留数定理によって, 各 a_j における留数 A_j を求める.

$$A_j = \frac{G_n(a_j)}{F_n'(a_j)} \tag{2.5}$$

ただし,

$$F_n'(a_j) = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n (a_j - a_k) \tag{2.6}$$

結局, 次の数値積分公式が構成できたことになる.

$$I_n = \sum_{j=1}^n A_j f(a_j). \tag{2.7}$$

2.2 数値実験

重み関数 $w(x) \equiv 1$ の場合, 区間 $(-1, 1)$ における積分

$$I = \int_{-1}^1 f(x) dx \tag{2.8}$$

を考える.

積分の定義関数は

$$\Psi(z) = \int_{-1}^1 \frac{1}{-1z - x} dx = \log \frac{z+1}{z-1} \tag{2.9}$$

で与えられる. カットは $[-1, 1]$ である. この Laurent 級数展開の係数の収束は $O(k^{-1})$ となり, 非常に遅い.

積分の標本点 a_j を以下の (i), (ii) のように分布させる.

(i) 等間隔分布

$$a_j = -1 + (j-1)h, \quad h = \frac{2}{n-1} \quad (2.10)$$

(j=1, 2, ..., n)

(ii) チェビシエフ分布

$$a_j = \cos((2j-1)h), \quad h = \frac{\pi}{2n} \quad (2.11)$$

(j=1, 2, ..., n)

いずれの分布においても、数値実験によれば、次の共通した現象が見られた。

(1) R を大きく取ると、計算値はオーバフローになる。逆に、 R が1に近付くと、計算精度は悪くなる。例えば、倍精度演算のとき、 $n=7$, $N=64$ のとき、 $R=1.8$ 付近の計算結果は最も良い。だから、ある n と N に応じて、 R の選択が必要である。

(2) N と R を一定にすれば、標本数 n が小さく(大きく)なるとともに、重み係数 A_j の精度は良く(悪く)なる。

(3) n と R が一定のとき、丸め誤差の影響を無視すれば、 N を大きく取るほど重み係数 A_j の精度が良くなる。一定の演算桁数のもとで、ある N を超えれば、精度の改善は見られない。

2.3 n, N, R の選択

n, N, R の関係について、次に考察する。

FFT で係数 c_k を求めるときに、半径 R の円周上に N 個の点を取ったが、標準 FFT ルーチンは半径 1 の円周上の標本を必要とするので、座標変換 $z \rightarrow Rw$ が必要である。得られた結果は、正規化によって元の変数に戻す。

実際には、以下の手順で行う。変数 w は w -平面の単位円の上を動くとして仮定する。

$$z = Rw$$

によって

$$\Psi(z)F_n(z) = \Psi(Rw)F_n(Rw).$$

右辺の w の関数に対して、FFT を適用し、得られた係数を b_k としよう。

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{n-1} b_k w^k + \sum_{k=1}^{N-n} b_{-k} w^{-k} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} b_k \left(\frac{z}{R}\right)^k + \sum_{k=1}^{N-n} b_{-k} \left(\frac{z}{R}\right)^{-k} \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} c_k z^k + \sum_{k=1}^{N-n} c_{-k} z^{-k} \end{aligned} \quad (2.12)$$

b_k を正規化した係数は c_k である。これでわかるように正規化とは正べきの係数 b_k を R の k 乗で割り、負べきの係数 b_{-k} に R の k 乗をかけるという演算

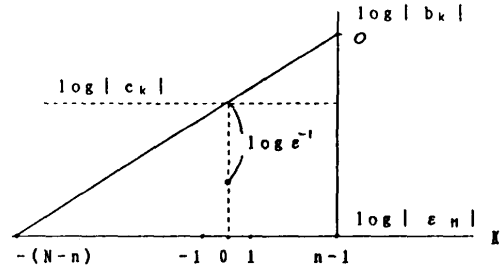


図3 係数 b_k, c_k の振舞い

Fig. 3 Behavior of coefficients of b_k, c_k .

をすることである。2.2節で述べたように、 c_k の収束は遅いため、正規化する前の係数 b_k は、次の性質を持つ。正べきの項の方は、 k が大きくなるにしたがって、その絶対値が大きくなっていく。負べきの項の方は、番号 k が大きくなるにつれて、指数関数的にどんどん小さくなる。

計算機の機械精度は ϵ_M 、(2.12)の正べきの係数 c_k に対する要求相対精度を ϵ とおくことにする。便宜上、 $|b_{n-1}|=1$ とし、 $n, N, R, \epsilon_M, \epsilon$ の間の関係を図示する(図3)。

c_k が要求精度を満たすために、次の不等式が成立しなければならない。

$$R^{-N} \leq \epsilon_M$$

$$R^{-n} \geq \frac{\epsilon_M}{\epsilon} \quad (2.13)$$

この条件を満たす R の中で小さい方を選ぶことが望ましい。

例1: 倍精度計算するときの $\epsilon_M=10^{-16}$, $n=7$, $N=64$, $\epsilon=10^{-10}$ のときの半径 R を求める。

$$R^{-64} \leq 10^{-16}, \quad R \geq 1.78$$

$$R^{-7} \geq 10^{-16-(10)}, \quad R \leq 7.19$$

数値実験によれば $R=1.8$ の付近に取るのがよい(表2~4)。

例2: $n=20$, $N=128$, $\epsilon_M=10^{-16}$, $\epsilon=10^{-13}$ のとき半径 R を求める。

$$R^{-128} \leq 10^{-16}, \quad R \geq 1.33$$

$$R^{-20} \geq 10^{-16-(13)}, \quad R \leq 1.41$$

$R=1.35$ の付近に取るのがよい。

例3: 7点 Newton-Cotes 則

$$n=7, \quad N=64, \quad R=1.8$$

標本点列: $\{-1, -2/3, -1/3, 0, 1/3, 2/3, 1\}$

$$\prod_{j=1}^7 (z-a_j) \cdot \log \frac{z+1}{z-1} \text{ を FFT で展開し}$$

$$G_7(z) = c_0 + c_1 z + \dots + c_6 z^6$$

の係数 c_k と重み A_j を求めた結果を示す(表1)。

表 1 7点 Newton-Cotes 則の $G_n(z)$ の係数および重み係数

Table 1 Coefficients of $G_n(z)$ and weights of seven points Newton-Cotes quadrature.

k	c_k	A_{k+1}
0	-0.3198118753674553D-01	0.0976190476190468
1	0.8942346048974235D-15	0.5142857142857136
2	0.5728395061728388D+00	0.0642857142857120
3	-0.1522226068807248D-14	0.6476190476190508
4	-0.2444444444444442D+01	0.0642857142857108
5	0.2940371438632830D-16	0.5142857142857171
6	0.199999999999997D+01	0.0976190476190440

重み A_j の数値の下線部は誤差である⁴⁾.

例 4 : 次の条件のもとで数値実験を行う.

積分区間 $[-1, 1]$

重み関数 $w(x)=1$

被積分関数 $f(x)=1$

積分の定義関数 $\Psi(z)=\log\frac{z+1}{z-1}$

積分の真値 $I=\int_{-1}^1 1 \cdot dx=2$

数値積分値 $I_n=\sum_{j=1}^n A_j$

積分の誤差 $\Delta I_n=I-I_n$

数値積分公式の精度, つまり重み A_j は何桁まで正しいかを知るための目安として, 被積分関数 $f(x)$ を定数 1 とおくことにした. 計算はすべて倍精度複素数演算で行った.

標本点 a_j は (1) 等間隔分布, (2) チェビシェフ分布の二つの場合を扱った. n, N, R は条件 (2.13) を満たすように取った.

表 2 と表 3 は, それらの実験結果である. いずれの場合も n が大きいとき, 丸め誤差の影響で, 数値積分公式の精度が悪くなる.

近似の領域は円の外部領域である限り, これ以上の精度の改善が期待できないので, 次に, 円の代わりに, 楕円を用いる.

2.4 楕円領域の外部で近似する場合

周知のように, Joukowski 変換

$$z = \frac{1}{2} \left(w + \frac{1}{w} \right) \quad (2.14)$$

によって, $[-1, 1]$ を除く z 平面の楕円の内部

$$|z + \sqrt{z^2 - 1}| < r, \quad r > 1$$

が w 平面の円環領域

$$1 < |w| < r$$

に写像される.

表 2 等間隔標本点の場合の ΔI_n

Table 2 ΔI_n for equi-distributed sample points.

n	N	R	ΔI_n	$\max A_j $
7	64	1.80	0.399D-14	0.64
9	128	1.35	0.599D-14	0.74
12	128	1.35	0.532D-14	0.57
15	128	1.35	0.888D-14	7.81
20	128	1.35	-0.915D-13	16.33
25	128	1.35	-0.149D-11	1725.62

表 3 チェビシェフ分布標本点の場合の ΔI_n

Table 3 ΔI_n for Chebyshev distributed sample points.

n	N	R	ΔI_n	$\max A_j $
7	64	1.80	0.311D-14	0.45
9	128	1.35	0.377D-14	0.34
12	128	1.35	0.622D-14	0.25
15	128	1.35	-0.528D-13	0.21
20	128	1.35	-0.294D-11	0.15
25	128	1.35	-0.117D-9	0.12

表 4 チェビシェフ分布標本点の場合の ΔI_n

Table 4 ΔI_n for Chebyshev distributed sample points.

n	N	R	ΔI_n	$\max A_j $
7	64	1.80	0.488D-14	0.45
9	128	1.35	0.844D-14	0.35
12	128	1.35	0.955D-14	0.25
15	128	1.35	0.120D-13	0.21
20	128	1.35	0.142D-13	0.16
25	128	1.35	0.231D-13	0.13
30	128	1.35	0.249D-13	0.10
35	128	1.35	0.253D-13	0.08
40	128	1.35	0.284D-13	0.06
45	128	1.35	0.371D-13	0.06
50	128	1.35	0.397D-13	0.06
60	128	1.35	0.477D-13	0.05

n 次チェビシェフ多項式 $T_n(z)$ の零点を積分の標本点に用いたとき, $F_n(z)$ は $T_n(z)$ を用いて次のように書くことができる.

$$F_n(z) = \prod_{j=1}^n (z - a_j) = 2^{-n+1} T_n(z) = 2^{-n} \left(w^n + \frac{1}{w^n} \right)$$

$$T_n(z) = \frac{1}{2} \left(w^n + \frac{1}{w^n} \right)$$

$$\Psi(z) F_n(z) = \Psi \left(\frac{w + w^{-1}}{2} \right) \cdot 2^{-n} (w^n + w^{-n})$$

(2.15)

これを w の関数とみて, 右辺の Laurent 級数展開を行う.

表 5 $w(x) \neq 1$ に対する DI_n
 Table 5 DI_n for $w(x) \neq 1$.
 $J=(-1, 1)$, $n=20$, $DI_n=I-I_n$, $N=128$, $R=1.35$

$w(x)$	$\Psi(z)$	I	DI_n
$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$\frac{\pi}{z\sqrt{1-\frac{1}{z^2}}}$	$\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \cdot 1 dx = \pi$	0.19×10^{-13}
$\frac{1}{x-2}$	$\frac{1}{z-2} \log_3 \frac{z+1}{z-1}$	$\int_{-1}^1 \frac{1}{x-2} dx = \log \frac{1}{3}$	-0.75×10^{-14}
$\frac{1}{x^2+4^2}$	$\frac{1}{z^2+4^2} \left(\log \frac{z+1}{z-1} + \frac{z}{2} \arctan \frac{1}{4} \right)$	$\int_{-1}^1 \frac{1}{x^2+4^2} dx = \frac{1}{2} \arctan \frac{1}{4}$	0.82×10^{-14}
$\frac{1}{x^2+x+1}$	$\frac{1}{2(z^2+z+1)} \left[\log \frac{3(z+1)^2}{(z-1)^2} + \frac{\pi}{\sqrt{3}}(2z+1) \right]$	$\int_{-1}^1 \frac{1}{x^2+x+1} dx = \frac{\pi}{\sqrt{3}}$	0.12×10^{-13}

$$\begin{aligned}
 & c_0 + c_1 w + \dots + c_{n-1} w^{n-1} + c_{-1} w^{-1} + c_{-2} w^{-2} + \dots \\
 &= c_0 + c_1(w + w^{-1}) + \dots + c_{n-1}(w^{n-1} + w^{-(n-1)}) \\
 &\quad - c_{-1} w^{-1} - c_{-2} w^{-2} - \dots - c_{n-1} w^{-(n-1)} \\
 &\quad + c_{-1} w^{-1} + c_{-2} w^{-2} + \dots \\
 &= c_0 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} c_k T_k(z) + (c_{-1} - c_1) w^{-1} + \dots \\
 &\quad + (c_{-(n-1)} - c_{n-1}) w^{-(n-1)} + c_{-n} w^{-n} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

結局, z に関する多項式の部分が $G_n(z)$ となる.

このようにすれば, 2.1 節で述べたように, FFT を用いて, 係数 c_k を求めることができる.

求めた $G_n(z)$ と与えられた $F_n(z)$ から重み A_j が得られる.

2.3 節と同じ実験条件のもとで, 重み A_j の誤差を調べた (表 4).

円の場合に比べ, 標本数 n が比較的大きいときもより正確に積分できる.

次に, 重み関数 $w(x) \neq 1$ の実験例を表 5 に示す.

3. 補間と数値微分への応用例

前述した理論と方法に基づいて, 補間と数値微分の公式を作ることもできる.

3.1 Lagrange 補間

補間の定義関数は

$$\Psi(z) = \frac{1}{z-x} \tag{3.1}$$

である.

この有理関数近似として $\Psi_n(z)$ は分母が n 次, 分子が $n-1$ 次の有理式を用いる.

標本点は等間隔分布とする ((2.10) と同様).

$f(x)$ の n 次 Lagrange 補間を

$$\sum_{k=1}^n l_k(x) f(a_k) \tag{3.2}$$

表 6 Lagrange 補間係数

Table 6 Lagrange interpolation coefficients.

k	$l_k(0)$
1	0.0068359375000001
2	-0.0527343750000005
3	0.1845703125000020
4	-0.4101562500000039
5	0.9228515625000029
6	0.3691406249999995
7	-0.0205078125000014

表 7 1階微分の係数

Table 7 Coefficients of first derivative.

k	$l_k^{(1)}(0.2)$
1	-0.0833333333333334
2	0.6249999999999999
3	-2.4999999999999982
4	0.8333333333333311
5	1.2500000000000016
6	-0.1250000000000010

表 8 2階微分の係数

Table 8 Coefficients of second derivative.

k	$l_k^{(2)}(0.2)$
1	0.0000000000000007
2	-0.5208333333333378
3	8.333333333333388
4	-15.6250000000000058
5	8.333333333333386
6	-0.520833333333346

と表す.

実験条件は $n=7$, $N=128$, $R=1.35$, $x=0$ としたときの Lagrange 係数 $l_k(0)$ を表 6 に示す.

3.2 数値微分

第 m 階導関数の定義関数は

$$\Psi(x) = \frac{m!}{(x-x)^{m+1}} \tag{3.3}$$

である.

この有理関数近似 $\Psi_n(x)$ は分母が n 次, 分子が $n-m-1$ 次の有理式である.

$f(x)$ の第 m 階導関数 $f^{(m)}(x)$ の n 点数値微分公式を

$$\sum_{k=1}^n l_k^{(m)}(x) f(a_k) \quad (3.4)$$

と表す.

$n=6, N=128, R=1.35, x=0.2$ として, 1階微分と2階微分の公式をそれぞれ表7と表8に示す.

数表⁴⁾によって, 計算結果は正しいことを確認した.

4. おわりに

本論文では, 高橋, 森の数値積分理論を数値積分公式の誤差評価ではなく, 数値積分公式の構成に応用した.

積分の定義関数 $\Psi(x)$ (一種の特殊関数) と数値積分公式の標本点を与えて, 各種の数値積分公式の重み係数を求める計算法を提案した. $\Psi(x)$ を積分区間を含むある円の外部で有理関数近似するとき, 円の大きさ, 数値積分および FFT の標本数は結果の精度に大きく影響する. われわれは, 有理関数近似の打ち切り誤差と計算法の数値的安定性の立場から, これらの諸量の満たすべき条件を明らかにし, FFT を本論文の目的に有効に利用した.

半無限, 無限積分に対しては, ここで提案した方法は, そのままでは適用できない. これらの問題は今後の課題である.

謝辞 指導と助言をいただいた名古屋大学工学部情報工学科三井斌友助教授, 杉浦洋助手, 桜井鉄也助手に感謝する.

参考文献

- 1) 森 正武: 数値解析と複素関数論, 筑摩書房 (1975).
- 2) Takahashi, H. and Mori, M.: Estimation of Errors in the Numerical Quadrature of Analytic Functions, *Applicable Analysis*, Vol. 1, pp. 201-229 (1971).
- 3) 森 正武, 名取 亮, 鳥居達生: 岩波講座情報科学—18 数値計算, 第五章, 岩波書店 (1982).
- 4) Abramowitz, M. and Stegun, I. A.: *Handbook of Mathematical Functions*, Applied Mathematics Series • 55, Chap. 25, NBS (1960).

(平成元年4月4日受付)

(平成元年9月12日採録)



孫 春蘭

1963年3月31日中国甘肅省蘭州市生. 1984年7月中国北京郵電大学電信工学部卒業. 1986年8月日本へ留学. 1989年3月名古屋大学工学研究科情報工学専攻修士修了.

現在株式会社メイテック (MEITEC) システム事業部技術部勤務中. 数値積分, FFT に興味がある.



鳥居 達生 (正会員)

昭和9年熊本県生. 昭和32年九州工業大学電気工学科卒業. 同年新日本窒素肥料(株)就職. 昭和39年同社退職. 同年大阪大学工学部助手(応用物理学科). 昭和50年名古屋

大学工学部情報工学科講師, 助教授を経て昭和60年教授. 数値解析, 数学ソフトウェアの研究に従事. とくに FFT を基礎に関数近似, 数値積分について研究している.