[CSE4152] 고급소프트웨어 실습 I
Week 6

서강대학교 공과대학 컴퓨터공학과
교수 임 인 성

공개 소프트웨어를 통한 문제 해결

- **6주차 실습의 목표**
  - Netlib와 같은 수치 계산용 SW 공개 사이트의 프로그램을 사용하여 응용 문제를 해결하여 본다.
  - C/C++ 프로그램에서 다른 언어(본 실습에서는 FORTRAN 언어)로 작성된 함수를 호출하여 문제를 해결하여 본다.

- **C/C++과 FORTRAN 함수의 혼용을 통한 문제 해결**
  - f2c와 코드 자동 변환 소프트웨어를 사용하는 방법
  - C/C++ 프로그램에서 FORTRAN 함수를 직접 호출하는 방법

✓LISP/PROLOG 프로그램에서 MATLAB에서 제공하는 C/C++ 함수를 호출할 수 있을까?

✓Python 프로그램에서 FORTRAN으로 작성한 math library의 함수를 호출할 수 있을까?

✓ https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_numerical_analysis_software 참조

Netlib Repository 소개

From Wikipedia

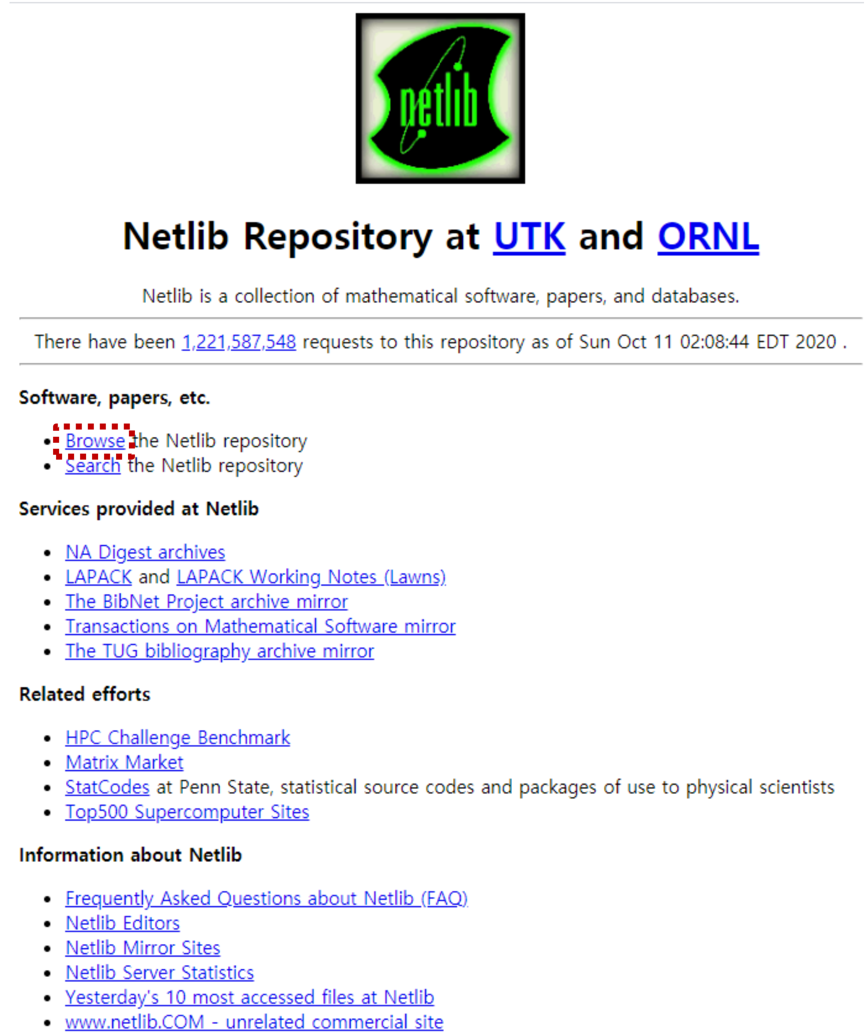
- **A repository of software for scientific computing** maintained by AT&T, Bell Laboratories, the University of Tennessee and Oak Ridge National Laboratory.

- Netlib comprises **a large number of separate programs and libraries**.

- Most of the code is **written in C and Fortran**, with some programs in other languages.

➢ 2021년 10월 10일 현재까지 총 1,295,632,734번의 코드 요청이 있었음.

URL: www.netlib.org



Netlib Repository at UTK and ORNL

Netlib is a collection of mathematical software, papers, and databases.

There have been 1,221,587,548 requests to this repository as of Sun Oct 11 02:08:44 EDT 2020 .

Software, papers, etc.

- Browse the Netlib repository
- Search the Netlib repository

Services provided at Netlib

- NA Digest archives
- LAPACK and LAPACK Working Notes (Lawns)
- The BibNet Project archive mirror
- Transactions on Mathematical Software mirror
- The TUG bibliography archive mirror

Related efforts

- HPC Challenge Benchmark
- Matrix Market
- StatCodes at Penn State, statistical source codes and packages of use to physical scientists
- Top500 Supercomputer Sites

Information about Netlib

- Frequently Asked Questions about Netlib (FAQ)
- Netlib Editors
- Netlib Mirror Sites
- Netlib Server Statistics
- Yesterday's 10 most accessed files at Netlib
- www.netlib.COM - unrelated commercial site

Main Index of Software Libraries

Search the Netlib Repository attribute/value database.

A more descriptive version of this list is also available.

Netlib Libraries:

a	fftpack	machines	random
access	fishpack	magic	research
aicm	fitpack	maspar	rib
alliant	floppy	math77	scalapack
amos	fmm	mds	sched
ampl	fn	microscope	scilib
anl-reports	fortran	minpack	seispack
apollo	fortran-m	misc	sequent
arpack	fp	mpfun	sfmm
atlas	gcv	mpi	slap
benchmark	gmat	mpicl	slatec
bib	gnu	na-digest-html	sminpack
bibnet	go	napack	sodepack
bihar	graphics	netsolve	sparse
blacs	harwell	news	sparse-blas
blas	hence	numeralgo	sparspak
blast	hompack	ode	specfun
bmp	hpf	odepack	spin
c	hypercube	odrpack	srwn
c++	ieeecss	opt	stoeplitz
cephes	ijsa	p4	stringsearch

BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms)

Menu

- Presentation:
  - Acknowledgments:
  - History
- Software:
  - Licensing:
  - REFERENCE BLAS Version 3.8.0
  - CBLAS
  - Level 3 BLAS tuned for single processors with caches
  - Extended precision Level 2 BLAS routines
  - BLAS for windows
  - GIT Access
  - The netlib family and its cousins
- Support
- Documentation
  - BLAS Technical Forum
  - Optimized BLAS Library
- BLAS Routines
  - LEVEL 1
  - LEVEL 2
  - LEVEL 3
  - Extended precision Level 2 BLAS routines

Questions/comments? lapack@icl.utk.edu

Contact us get the lastest news

BLAS(Legacy Website) FAQ

C/C++와 FORTRAN 언어 간의 차이

	C 언어	FORTRAN 언어
매개 변수 전달 방법	call by value	call by reference
행렬 저장 방법	row-major order	column-major order

$$\begin{array}{cc} & \overbrace{\begin{array}{ccccc} & & & 3 & \end{array}}^{5} \\ 2 \rightarrow & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 15 & 16 & 17 & 18 & 19 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$(2,3) = 2 \times 5 + 3 = 13$$

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccccc} & & & 3 & \end{array} \\ 2 \rightarrow & \left. \begin{bmatrix} 0 & 4 & 8 & 12 & 16 \\ 1 & 5 & 9 & 13 & 17 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 18 \\ 3 & 7 & 11 & 15 & 19 \end{bmatrix} \right\} 4 \end{array}$$

$$(2,3) = 3 \times 4 + 2 = 14$$

Netlib 함수를 사용한 다항식의 근 구하기

- **문제:** 다음 n차 다항식의 모든 근을 구하라.
  - ✓ n차 다항식의 근은 실근, 허근, 중근을 포함하여 정확히 n개가 존재함

$$p_n(x) \quad = \quad a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 = 0$$

- **방법:** Netlib의 rpoly.f 함수를 사용하여 해결함.
  - rpoly.f의 RPOLY() 함수의 인자들의 의미를 이해해야 함. 자세한 방법은 강의자료 참조.

```
      SUBROUTINE RPOLY(OP, DEGREE, ZEROR, ZEROI,
     * FAIL)
C FINDS THE ZEROS OF A REAL POLYNOMIAL
C OP  - DOUBLE PRECISION VECTOR OF COEFFICIENTS IN
C       ORDER OF DECREASING POWERS.
C DEGREE - INTEGER DEGREE OF POLYNOMIAL.
C ZEROR, ZEROI - OUTPUT DOUBLE PRECISION VECTORS OF
C       REAL AND IMAGINARY PARTS OF THE
C       ZEROS.
C FAIL - OUTPUT LOGICAL PARAMETER, TRUE ONLY IF
```

RPOLY Function

```
      SUBROUTINE RPOLY(OP, DEGREE, ZEROR, ZEROI,
     * FAIL)
C FINDS THE ZEROS OF A REAL POLYNOMIAL
C OP - DOUBLE PRECISION VECTOR OF COEFFICIENTS IN
C      ORDER OF DECREASING POWERS.
C DEGREE - INTEGER DEGREE OF POLYNOMIAL.
C ZEROR, ZEROI - OUTPUT DOUBLE PRECISION VECTORS OF
C      REAL AND IMAGINARY PARTS OF THE
C      ZEROS.
C FAIL - OUTPUT LOGICAL PARAMETER, TRUE ONLY IF
```

이 함수는 주어진 n차 다항식 $p_n(x)$에 대하여,

차수 n을 이름이 DEGREE인 int 타입의 변수에,

그리고 $n+1$개의 계수들을 고차항의 계수부터 차례대로 ($\{a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0\}$) 이름이 OP인 double 타입의 배열을 통하여 넘겨 받아,

$$p_n(x) \quad = \quad a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 = 0$$

```
      SUBROUTINE RPOLY(OP, DEGREE, ZEROR, ZEROI,
     * FAIL)
C FINDS THE ZEROS OF A REAL POLYNOMIAL
C OP - DOUBLE PRECISION VECTOR OF COEFFICIENTS IN
C      ORDER OF DECREASING POWERS.
C DEGREE - INTEGER DEGREE OF POLYNOMIAL.
C ZEROR, ZEROI - OUTPUT DOUBLE PRECISION VECTORS OF
C      REAL AND IMAGINARY PARTS OF THE
C      ZEROS.
C FAIL - OUTPUT LOGICAL PARAMETER, TRUE ONLY IF
```

n개의 근 $\alpha_i + \beta_i \mathbf{i}$ $(i = 0, 1, 2, \cdots, n-1)$을 구한 후,

실수부 (real part)에 해당하는 값들 $(\{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{n-1}\})$을 이름이 ZEROR인 double 타입의 배열에 담아,

그리고 허수부 (imaginary part)에 해당하는 값들 $(\{\beta_0, \beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_{n-1}\})$을 이름이 ZEROI 인 double 타입의 배열에 담아 넘겨주게 된다.

또한 이름이 FAIL인 long int 타입의 변수에 함수 수행 결과에 대한 정보를 담아 넘겨주는데, 이에 대한 설명을 발췌하면 다음과 같다.

```
#include <stdio.h>

#include <math.h>

#define DEGREE 4

#define NCOEF 5

extern "C"

{

   int rpoly_(double *, int *, double *, double *, long int *);

}

 void main(void) {

   double poly[NCOEF] = { 1.0, -11.0, 42.35, -66.55, 35.1384 };

   int degree = DEGREE;

   double zeror[DEGREE], zeroi[DEGREE];

   long int fail;

   int i;

   rpoly_(poly, &degree, zeror, zeroi, &fail);


   if (fail) { ··· }

   for (i = 0; i < degree; i++) printf("%10f ", zeror[i]); printf("\n");

   for (i = 0; i < degree; i++) printf("%10f ", zeroi[i]); printf("\n");

}
```

```
      SUBROUTINE RPOLY(OP, DEGREE, ZEROR, ZEROI,
     * FAIL)
C FINDS THE ZEROS OF A REAL POLYNOMIAL
C OP - DOUBLE PRECISION VECTOR OF COEFFICIENTS IN
C      ORDER OF DECREASING POWERS.
C DEGREE - INTEGER DEGREE OF POLYNOMIAL.
C ZEROR, ZEROI - OUTPUT DOUBLE PRECISION VECTORS OF
C      REAL AND IMAGINARY PARTS OF THE
C      ZEROS.
C FAIL - OUTPUT LOGICAL PARAMETER, TRUE ONLY IF
```

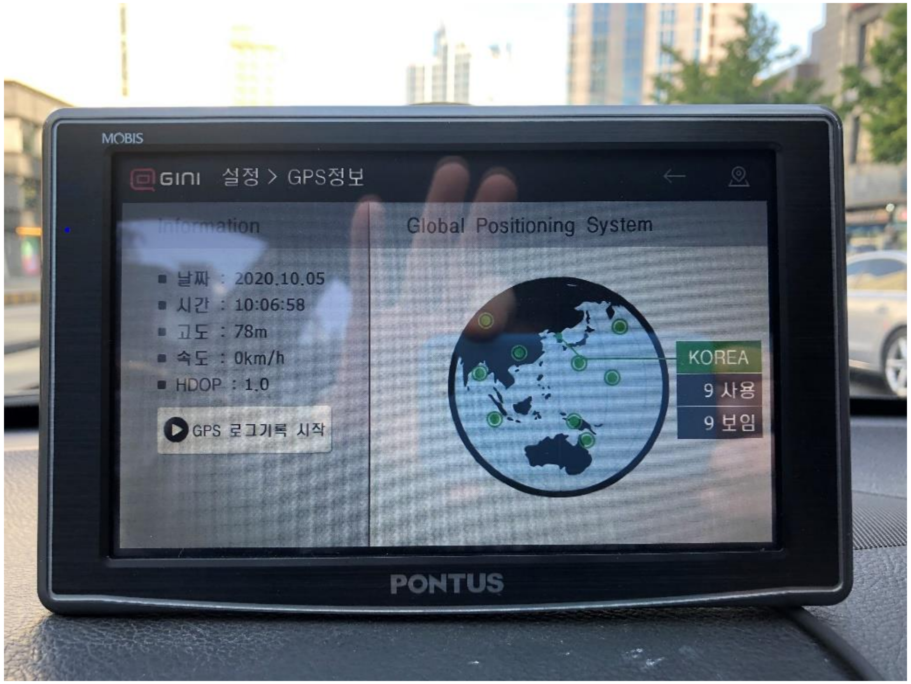
	C 언어	**FORTRAN 언어**
매개 변수 전달 방법	call by value	call by reference
행렬 저장 방법	row-major order	column-major order

$$\boxed{p_4(x) = x^4 - 11.0x^3 + 42.35x^2 - 66.55x + 35.1384 = 0}$$

GPS 수신기의 위치 계산 문제

- **문제: 다음의 System of Nonlinear Equations을 풀어라.**

$$
\begin{aligned}
f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{11})^2 + (x_2 - p_{12})^2 + (x_3 - p_{13})^2 - \{\,C(tr_1 + x_4 - t_1)\,\}^2 = 0 \\
f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{21})^2 + (x_2 - p_{22})^2 + (x_3 - p_{23})^2 - \{\,C(tr_2 + x_4 - t_2)\,\}^2 = 0 \\
f_3(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{31})^2 + (x_2 - p_{32})^2 + (x_3 - p_{33})^2 - \{\,C(tr_3 + x_4 - t_3)\,\}^2 = 0 \\
f_4(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{41})^2 + (x_2 - p_{42})^2 + (x_3 - p_{43})^2 - \{\,C(tr_4 + x_4 - t_4)\,\}^2 = 0
\end{aligned}
$$



Newton-Raphson 방법

- **System of nonlinear equations**

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_1(x_1,x_2,x_3,x_4) &= (x_1-p_{11})^2+(x_2-p_{12})^2+(x_3-p_{13})^2-\{C(tr_1+x_4-t_1)\}^2 = 0 \\ f_2(x_1,x_2,x_3,x_4) &= (x_1-p_{21})^2+(x_2-p_{22})^2+(x_3-p_{23})^2-\{C(tr_2+x_4-t_2)\}^2 = 0 \\ f_3(x_1,x_2,x_3,x_4) &= (x_1-p_{31})^2+(x_2-p_{32})^2+(x_3-p_{33})^2-\{C(tr_3+x_4-t_3)\}^2 = 0 \\ f_4(x_1,x_2,x_3,x_4) &= (x_1-p_{41})^2+(x_2-p_{42})^2+(x_3-p_{43})^2-\{C(tr_4+x_4-t_4)\}^2 = 0 \end{aligned}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} \mathbf{F}(x_1, x_2, \cdots, x_n) = (f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n),\ f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n), \cdots,\ f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n))^t \\ \mathbf{F}: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n \qquad \mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n),\ \mathbf{0} = (0, 0, \cdots, 0)^t \end{array}}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

- n = 1 $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$

$$\boxed{f(x) = 0 \longrightarrow \quad x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)},\ k = 0, 1, 2, \cdots}$$

- n > 1

$$\boxed{\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - J(\mathbf{x}^{(k)})^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}),\ k = 0, 1, 2, \cdots}$$

$$\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \cdots, x_n^{(k)})^t$$

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}) &= \frac{\partial(f_1, f_2, \cdots, f_n)}{\partial(x_1, x_2, \cdots, f_n)}(\mathbf{x}) \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

야코비 행렬(Jacobian matrix)

minpack 함수를 사용한 비선형 방정식 시스템의 풀이

- **HYBRJ1 함수를 사용한 문제 풀이**
  - 변형된 **Powell 방법** 사용
  - Solver에게 **방정식 외에도 야코비 행렬을 함수 형태로 제공해야 함**.
  - ✓ 자세한 방법은 강의 자료 참조

$$\mathbf{F}(x_1, x_2, \cdots, x_n) = (f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n),\ f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n), \cdots,\ f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n))^t$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n),\ \mathbf{0} = (0, 0, \cdots, 0)^t$$

$$J(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \end{pmatrix}$$

$$\boxed{\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{11})^2 + (x_2 - p_{12})^2 + (x_3 - p_{13})^2 - \{C(tr_1 + x_4 - t_1)\}^2 = 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{21})^2 + (x_2 - p_{22})^2 + (x_3 - p_{23})^2 - \{C(tr_2 + x_4 - t_2)\}^2 = 0 \\ f_3(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{31})^2 + (x_2 - p_{32})^2 + (x_3 - p_{33})^2 - \{C(tr_3 + x_4 - t_3)\}^2 = 0 \\ f_4(x_1, x_2, x_3, x_4) &= (x_1 - p_{41})^2 + (x_2 - p_{42})^2 + (x_3 - p_{43})^2 - \{C(tr_4 + x_4 - t_4)\}^2 = 0 \end{aligned}}$$

HYBRJ1 Function

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

n: 변수의 개수 (즉 방정식의 개수)를 나타내는 int 타입의 양의 정수.

x: n개의 double 타입의 원소를 가지는 배열. 함수 호출 시에는 초기값 $\mathbf{x}^{(0)}$을 저장해 주어야 하며, 함수 리턴 시 이 함수가 구한 근 (정확히 말해서 근에 대한 추정값) $\mathbf{x}$를 저장하고 있음.

$$\boxed{\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - J(\mathbf{x}^{(k)})^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}), \; k = 0, 1, 2, \cdots}$$

$$\mathbf{F}(x_1, x_2, \cdots, x_n) = (f_1(x_1, x_2, \cdots, x_n), \; f_2(x_1, x_2, \cdots, x_n), \cdots, \; f_n(x_1, x_2, \cdots, x_n))^t$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n), \; \mathbf{0} = (0, 0, \cdots, 0)^t$$

HYBRJ1 Function

$$
\begin{array}{cc}
 & \overbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad}^{5} \quad \overset{3}{\downarrow} \\
 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 15 & 16 & 17 & 18 & 19 \end{bmatrix} \\
2 \rightarrow &
\end{array}
\qquad
\begin{array}{cc}
 & \overset{3}{\downarrow} \\
 & \left(\begin{bmatrix} 0 & 4 & 8 & 12 & 16 \\ 1 & 5 & 9 & 13 & 17 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 18 \\ 3 & 7 & 11 & 15 & 19 \end{bmatrix}\right) 4 \\
2 \rightarrow &
\end{array}
$$

$(2,3) = 2 \times 5 + 3 = 13$ $\qquad$ $(2,3) = 3 \times 4 + 2 = 14$

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

$$
J(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(\mathbf{x}) & \frac{\partial f_n}{\partial x_2}(\mathbf{x}) & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(\mathbf{x}) \end{pmatrix}
$$

ldfjac: 야코비 행렬 관련 정보 저장을 위한 공간인 2차원 배열 fjac의 실제 행의 개수로서 n보다 같거나 큰 int 타입의 양의 정수. C 언어와는 달리 FORTRAN에서는 열 우선 순서로 저장이 되기 때문에 실제 fjac 행렬이 double fjac[MATROWS][MATCOLS];와 같이 정의가 되었다면 MATROWS 값을 알아야 주소 계산이 가능하므로, 함수 호출 시 이 값을 ldfjac 변수를 통하여 넘겨주어야 함. 가장 간단한 방법은 double fjac[N][N]; 과 같이 n행 n열 행렬 공간을 잡은 후 n 값을 넘기는 것이다.

HYBRJ1 Function

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

fvec: 함수 리턴 시 $\bar{\mathbf{x}}$에서의 함수값 $\mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}})$를 저장하고 있는 n개의 double 타입의 원소를 가지는 배열.

fjac: 함수 리턴 시 $\bar{\mathbf{x}}$에서의 야코비 행렬 $J(\bar{\mathbf{x}})$와 관련된 정보를 저장하고 있는 double 타입의 배열. 그 크기는 최소한 n행 n열 행렬을 저장할 수 있을 정도로 커야 함.

tol: 함수 호출시 넘겨주어야 하는 0보다 같거나 큰 double 타입의 값으로서, 현재까지 구한 근 추정값 $\bar{\mathbf{x}}$와 정확한 근과의 상대 오차가 이 값보다 같거나 작다고 판단될 때에 계산을 멈춤.

HYBRJ1 Function

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - J(\mathbf{x}^{(k)})^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}),\ k = 0, 1, 2, \cdots$$

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

fcn: 이 함수는 자신이 C 언어로 작성하여 제공하는 함수로서 임의의 $\mathbf{x}$에 대한 다변수 함수값 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$와 야코비 행렬값 $J(\mathbf{x})$를 계산해주는 것을 목적으로 한다. 이 함수는 FORTRAN에서는 다음과 같이 정의가 되는데,

The value of iflag should not be changed by fcn.

```
subroutine fcn(n, x, fvec, fjac, ldfjac, iflag)
integer n,ldfjac,iflag
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n)
```

이에 대응하여 C에서는 다음과 같은 프로토타입의 함수를 작성하면 된다.

```
void fcn(int *n, double *x, double *fvec, double *fjac, int
*ldfjac, int *iflag);
```

HYBRJ1 Function

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - J(\mathbf{x}^{(k)})^{-1}\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}),\ k = 0, 1, 2, \cdots$$

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

wa: 이 함수를 호출하는 함수에서 다음 인자 lwa가 저장하고 있는 양의 정수 개 만큼의 원소를 가지는 double 타입의 배열에 대한 메모리 영역을 확보한 후, 함수 호출 시 이 배열을 넘김. 이 영역은 근을 구하는 계산 시 임시 데이터를 저장하기 위한 영역으로 쓰임.

lwa: 함수 호출 시 wa 배열의 길이를 지정하는 int 타입의 변수로서, (n*(n+13))/2보다 같거나 큰 양의 정수값을 가져야 함.

HYBRJ1 Function

```
subroutine hybrj1(fcn,n,x,fvec,fjac,ldfjac,tol,info,wa,lwa)
integer n,ldfjac,info,lwa
double precision tol
double precision x(n),fvec(n),fjac(ldfjac,n),wa(lwa)
external fcn
```

info: 함수 리턴 시 함수 수행 결과에 대한 정보를 저장하는 int 타입의 정수 변수로
그에 대한 설명을 발췌하면 다음과 같음.

info is an integer output variable. If the user has terminated execution, info is set to the (negative) value of iflag (see description of fcn). Otherwise, info is set as follows.

a) info = 0: Improper input parameters.

b) info = 1: Algorithm estimates that the relative error between x and the solution is at most tol.

c) info = 2: Number of calls to fcn with iflag = 1 has reached 100*(n+1).

d) info = 3: tol is too small. No further improvement in the approximate solution x is possible.

e) info = 4: Iteration is not making good progress.