공학석사 학위논문

유전 알고리즘을 이용한 3차원 PTV기법의 개발에 관한 연구

Development of 3-D Particle Tracking Velocimetry using Genetic Algorithm

지 도 교 수 도 덕 희

2001年 2月

한국해양대학교 대학원

냉 동 공 조 공 학 과

조 경 래

본 논문을 조경래의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 중 우 인

위 원 도 덕 희 인

위 원 도 근 영 인

2000年 12月 23日

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과 조 경 래

목 차

List of Tables

List of Figures

Development of 3-D PTV using GA

by

Cho Gyeong-Rae

Department of Refrigeration and Air Conditioning
Engineering Graduate School Korea Maritime University

Abstract

A new 3-D PTV(Particle Tracking Velocimetry) using a Genetic Algorithm is introduced. The measurement system consists of 3 CCD Camera, an Image grabber and an Ar-ion Laser. The fundamental of the developed technique is based on that one-to-one correspondence is found between two tracer particles selected at two different image frames taking advantage of combinatorial optimization of the Genetic Algorithm. The fitness function controlling reproductive success in the Genetic Algorithm is expressed by a kind of continuum theory on the sparsely distributed particles in space. The number of identified particles as 3-Dimensional vectors was about 1000 which corresponded to about 65 percent of the whole particles in the flow field. In the experiment, turbulent characteristics of a backward-facing step flow are probed. The capability of the developed Genetic Algorithm is verified through a test of the Standard Images on the web site of VSJ (http://www.vsj.or.jp/piv)

Nomenclature

$3DE$	: Fitness for 3-D position of particle
A_i	: Coefficient of area moment
B, B_{ii}	: Inverse matrix of M
C	: Fitness for continuous fluid of vector
$c,\ c_x,\ c_y$	: Plane distance from lens center
$D,\ D_s, D_e$	: Error of calculated 3-D position of particles
D_i	: Divergence of velocity
dis	: Distance of projection
D_M	: Thresholding value of D_i
d_p	: Diameter of particle
F	: Equation of observation for x-direction
G	: Equation of observation for y-direction
I	: Intensity of particle
I_0	: Maximum intensity of particle
$k_1,\ k_2$	: Lens coefficient
M_M, M_X, M_Y, M_Z	: Rotation matrix
$m_x,\ m_y$	: Movement value of principle pointMovement value of principle point
Re_H	: Reynolds number of a half of depth
RES	: Reynolds shear stress
R_R	: Recovery ratio
R_{uv}	: Reynolds shear stress($-\overline{u'v'} / U_0^2$)

R_{uw} : Reynolds shear stress($-\overline{u'w'} / U_0^2$)

R_{vw} : Reynolds shear stress($-\overline{v'w'} / U_0^2$)

o : Original point of photographic coordinate system

O : Original point of absolute coordinate system

p : Particle on images

P : Particle in space

S_X, S_Y, S_Z : Standard deviation of 3-D position

TKE : Turbulence kinetic energy($\frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)

T_u : Turbulence intensity($\sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)

T_v : Turbulence intensity($\sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)

T_w : Turbulence intensity($\sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)

V_G : Generated vector by random

V_R : Recovered vector less than 0.1mm in error

U_{RSS} : Uncertainty in measuring of velocity

$\triangle x$, $\triangle y$: Lens distortion value

$\overline{x}$, $\overline{y}$: Center point of particle

x_0, y_0 : Deviation of the principal point from the center of image

x_i, y_i : Value of the photographic position of particle

x, y, z : Photographic coordinate system

X , Y, Z : Absolute coordinate system

X_0 , Y_0, Z_0 : Center of projection

X_i, Y_i, Z_i : Value of the 3-D position of particle

X_m, Y_m, Z_m : Rotated absolute coordinate system

Greek characters

α, ω : Tilted angle for X axis

β, ψ : Tilted angle for Y axis

$\varkappa$: Tilted angle for Z axis

σ_l : Radius of cylindrical light

$\overline{}$: Time averaged value

제 1 장 서 론

충분한 정확도와 신뢰도를 가진 다양한 난류계측에서 열선유속계와 LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 계측에 널리 적용되어져 왔다. 그러나 이러한 계측법은 기본적으로 측정대상공간에 대하여 한 점에 대한 정보밖에 얻을 수 없다. 그러한 이유로 동시 다점계측이라는 장점을 가진 PIV(Particle Imaging Velocimetry) 계측기법에 의해 얻어내는 연구성과들이 계속 증가 추세에 있으며, 특히 난류에 대한 많은 정보를 얻기 위해서는 3방향의 (u, v, w)속도 성분을 동시에 계측하는 것이 요구되어지고, 이러한 3차원 계측이 활발히 진행되어지고 있다.

유동장의 유체와 동일한 비중의 미소추적입자를 투입하여 광원과 카메라로 가시화 한 후 디지털화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 정량적으로 추적하는 방법을 PTV (Particle Tracking Velocimetry)라 한다. Chang과 Tatterson (1983)과 Change et al.(1984)들은 다중사진기법으로 실용적인 속도계를 처음으로 고안하여 3차원성이 강한 유동의 난류 유동계측에 성공하였으나, 카메라의 작은 시선각으로부터 얻어진 3차원 좌표에서 깊이방향의 정확도가 떨어진다는 단점을 보였다. Yamakawa와 Iwashige(1986), Racca와 Dewey(1988), Adamczyk와 Rimai (1988), 그리고 Kobayashi et al.(1989) 등은 직각방향에서 유동장을 관찰함으로써 단점을 극복하였으나 이들 기법들 또한 단순유동장의 계측에만 적용되었다. 이러한 기법들은 속도가 상대적으로 빠르거나 조사영역이 작은 경우의 속도분포를 계측하는데 어려운 점이 있다.

Kobayashi et al.(1991)등은 이러한 단점을 극복하기 위해 AOM(Acousto Optical Modulator)이라 불리우는 광학장치를 이용하여 4-Frame PTV 계측법을 구축하였으나, 결과가 2차원 계측에 한정되었고, 계측결과도 Baek과 Lee(1996)의 2-Frame PTV알고리즘 보다 상대적으로 낮았다. 또한, Multi-frame PTV방법은 여러장의 연속적인 이미지를 사용하여 동일입자를 추적하는 알고리즘을 채택하고 있기 때문에 상대적으로 속도가 빠르거나 3차원성이 강한 복잡한 유동장에 적용하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 Doh et al.(1999)의

연구에서는 1-Frame 3-D PTV 알고리즘을 개발하였다.

한편, 유전자 알고리즘은 자연세계의 진화 현상인 적자생존에 기초한 최적화 알고리즘으로, 주어진 문제의 탐색공간 내에서 최적화 할 목적 함수에 대해 초기 해로부터 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐 새로운 자손을 인공적으로 만들어 내고, 자연의 생물유전을 모방한 연산자들을 반복적으로 적용하여 적합한 해를 탐색하는 방법이다.

유전자 알고리즘은 1970년대 John Holland에 의해서 정립이 되었고, 이후 Rosenberg, De Jong에 의해서 인공지능과 유전자적인 요소를 가미시키면서 발전해 나갔다. 일반적으로 초기 연구단계에서는 2진 스트링, 2진 돌연변이 2진 교배를 하였으나, 1985년 De Jong에 의해 새로운 방향이 제시되었고, 최근 10년 동안 고전적인 유전알고리즘으로 직접 적용하기가 어려운 여러 가지 응용분야에서 더욱 풍부한 데이터 구조를 사용한 변경된 유전자 알고리즘방법들이 소개되고 있다. 1990년에 Koza는 진화기반 시스템인 유전자 프로그래밍(Genetic Programming)을 제안하여 어떤 문제를 해결하기 위한 가장 적합한 컴퓨터 프로그램을 찾아내었다. 이러한 모든 진화기반 시스템에 대해 진화 프로그램(EP : Evolution Program)이라고 한다.

이러한 유전알고리즘은 다른 탐색 알고리즘과 비교할 때, 일부지점이 아닌 전역에서 해를 찾아가며, 이산적 규칙이 아닌 확률적 천이규칙을 따르며 탐색공간에 대한 연속성이나 미분가능성 등의 제약성이 없으며 국부해에 수렴하는 문제를 억제한다는 이점을 가졌다.

또한 유전알고리즘은 목적함수의 설정에 제한을 받지 않는다는 장점 때문에 최적화 설계, 인공지능, 시스템 분석 및 예측, 제어 및 로보틱스 등 많은 분야에서 적용되고 있으며, 그외 많은 분야에서 발전가능성이 높은 것으로 예상되고 있다.

유전알고리즘을 PTV 계측방법에 적용한 Yamada et al.(1995)은 두 프레임간의 패턴을 매칭을 이용하여 속도를 계측하는 알고리즘을 개발하였고, Ohyama et al.(1993)은 모든 입자의 이동거리가 최소가 되도록 적합도를 정의한 유전 알고리즘을 이용하여 2차원 속도 계측을 하였고, 이러한 유전 알고리즘을 3차원에 확장

하여 적용하였다(1995). 최근 Kimura et al.(1998)은 유동의 패턴을 적합도로 하는 2차원 유전알고리즘을 소개하였다. 그외에 Kimura et al.(1993)과 Sugii et al.(1996, 1998)에 의해 다양한 방법으로 유동장의 계측에 유전알고리즘이 적용되고 있다. 국내에서도 Dho et al.(1998, 1999)등에 의해 2차원에 대한 유전알고리즘 계측기법이 소개된 적이 있으며, 상당히 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

그러나, 현재까지 많은 3차원 PTV 계측법이 소개되고 있으나, 아직까지 실제 실험에 적용하기는 힘들다고 생각된다. 그러한 이유로 시간-공간 탐색법을 사용한 Kobayasi et al.(1991)의 4-Frame방법은 사용된 모든 Frame안에 입자가 존재해야 하며 시간간격 또한 일정해야 한다는 제약조건 때문에 상대적으로 높은 속도를 가진 유동장이나 복잡한 유동장에 적용하기 힘들며, 공간-시간 탐색법을 사용하는 Doh et al.(1999), Ohyama et al.(1993), Okamoto et al.(1995)등이 제시한 알고리즘도 가상영상 이나 3차원 공간 데이터 상의 거의 100%에 달하는 좋은 결과를 보였으나, 입자의 중심을 찾아 입자를 추적하는 PTV 방법에서는 사라지는 입자, 입자중심의 오차 등이 결과에 영향을 많이 미치게 됨으로 아직 순시 3차원 속도 벡터를 구하기에는 어려운 단계에 와있다.

본 연구에서는 기존의 방법과 달리 시간-공간, 공간-시간이 아닌 시공간을 동시에 탐색함으로서 이러한 사라지는 입자나, 입자중심의 오차에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 구축하고자 한다.

먼저 2장에서는 입자의 3차원 위치를 계산하기 위해 기존 11개의 표정요소를 가진 카메라정보를 10개의 표정요소로 수정하였으며, 그러한 수정된 10개의 표정요소를 사용하는 관측방정식 및 공선의 조건에 의한 3차원 위치 계산의 원리를 소개하였다.

3장에서는 일반적인 유전 알고리즘을 소개하고, 3차원 PTV에서 유전 알고리즘의 적용방법에 관한 개체, 집단, 목적함수, 그리고 유전 연산자 등에 관하여 기술하였다.

4장에서는 가상영상기법을 소개하고, 3차원 채널 및 충돌 제트유동에 대한 가상

영상기법을 적용하여 알고리즘의 성능평가를 하였다.

5장에서는 유동박리, 재순환 영역의 발생, 재부착후 난류경계층의 재발달 등 공학에서 자주 나타나는 유동의 특성을 지닌 후향단 실험을 통하여 본 유전알고리즘을 이용한 3차원 PTV가 비정상 난류의 계측이나 복합구조의 유동해석에 매우 유용함을 나타내었으며, 이들 해석의 결과를 6장에서 정리하였다.

제 2 장 3차원 계측의 원리

2.1 표정요소의 정의 및 계산

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이러한 카메라 정보와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 된다. 이러한 원리로부터 Kobayasi et al.(1989, 1990, 1991)과 Dho et al.(1991, 1995, 1997, 1998, 1999) 등은 외부요소 (X_0, Y_0, Z_0, ω, ϕ, κ)와 내부요소 (c, x_0, y_0, k_1, k_2)등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용했다.

그러나, 이러한 표정요소는 카메라 정보를 구할 때 복잡한 여러 가지 과정을 거쳐야 했다. 또한, Multi-frame PTV 방법처럼 2차원 속도 벡터를 찾고, 동일 입자에 대한 3차원 공간을 계산하는 방식이나, 1-Frame 3-D PTV 방법처럼 먼저 3차원 좌표를 결정한 다음 3차원 속도 벡터를 결정하는 방식에는 적합하지만, 본 연구에서 사용하는 유전알고리즘은 시간과 공간을 동시에 찾는 방식이므로 그대로 적용하기가 곤란하였다.

따라서 본 연구에서는 외부요소(dis, α, β, κ, m_x, m_y)와 내부요소 (c_x, c_y, k_1, k_2)등 10개의 요소를 정의하고, 새로운 관측방정식을 식(2.2)와 같이 정의하였다.

Fig. 2.1 은 절대좌표계(X, Y, Z)에 대한 사진좌표계(x, y, z)의 관계를 보여 주고 있다. 먼저 dis는 절대좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉 O점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 사진좌표계와 절대좌표계를 일치시키기 위해 X, Y, Z축에 대한 회전각을 각각 α, β, κ로 정의하면, 축에 대한 회전행력은 $M_M = M_Z M_Y M_X$가 된다. 즉 X, Y(α, β)축 회전에 의해 사진좌표계의 z축과, 절대좌표계의 Z축이 평행하게 되며, 다시 Z(κ)축 회전에 의해 사진좌표계의 x, y축과, 절대좌표계의 X, Y축이 서로 평행하게 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (X_m, Y_m, Z_m)으로 표시한다. 여기서 사진좌표계의 z축과 절대

좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을 m_x, m_y로 표시한다. 이러한 과정을 거치면, Fig. 2.2와 같은 사진좌표계의 xy평명과 절대좌표계의 X, Y, Z 사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 식(2.1)과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \triangle x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \triangle y \end{aligned} \tag{2.1}$$

단, c_x, c_y : 이미지그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 초점거리

$\triangle x$, $\triangle y$: 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절량

$$\left(\triangle x = \frac{x}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right), \quad \triangle y = \frac{y}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \right)$$

식 (2.1)같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 절대좌표값(X_i, Y_i, Z_i)과 사진좌표값(x_i, y_i)에 대해 관측방정식 F, G는 식 2.2와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (x - \triangle x) = 0 \\ G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (y - \triangle y) = 0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

이러한 관측방정식 F, G는 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 표정요소의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss-Newton법을 사용하였다.

2.2 위치 결정의 원리

카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표(x, y)와 절대좌표(X, Y, Z)간에 식

(2.2)**로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.**

$$
\begin{aligned}
F &= > \frac{c_x(X_m - m_x)}{d - Z_m} - (x - \triangle x) = 0 \\
&= > \quad X_m = \frac{(x - \triangle x)}{c_x}(d - Z_m) + m_x \\
G &= > \frac{c_y(Y_m - m_y)}{d - Z_m} - (y - \triangle y) = 0 \\
&= > \quad Y_m = \frac{(y - \triangle y)}{c_y}(d - Z_m) + m_y
\end{aligned}
\tag{2.3}
$$

단, $d = \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2}$

여기서 $d - Z_m = t$ **라 두면**

$$
\begin{aligned}
X_m &= \frac{x - \triangle x}{c_x} t + m_x \\
Y_m &= \frac{y - \triangle y}{c_y} t + m_y \\
Z_m &= d - t
\end{aligned}
\tag{2.4}
$$

이 된다. 회전변환행렬을 M_M**이라 두고, 역행렬을** B**라두면**

$$
\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = M_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix}
\tag{2.5}
$$

이므로 X, Y, Z**에 관해 정리하면,**

$$
\begin{aligned}
X &= B_{11}X_m + B_{12}Y_m + B_{13}Z_m \\
&= \left(B_{11}\frac{s_x}{c_x} + B_{12}\frac{s_y}{c_y} - B_{13}\right) + (B_{11}m_x + B_{12}m_y + B_{13}d) \\
Y &= B_{21}X_m + B_{22}Y_m + B_{23}Z_m \\
&= \left(B_{21}\frac{s_x}{c_x} + B_{22}\frac{s_y}{c_y} - B_{23}\right) + (B_{21}m_x + B_{22}m_y + B_{23}d) \\
Z &= B_{31}X_m + B_{32}Y_m + B_{33}Z_m \\
&= \left(B_{31}\frac{s_x}{c_x} + B_{32}\frac{s_y}{c_y} - B_{33}\right) + (B_{31}m_x + B_{32}m_y + B_{33}d)
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

단, $s_x = x - \triangle x$, $s_y = y - \triangle y$

이 되며, 카메라의 위치(X_0, Y_0, Z_0)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_0 &= B_{11}mx + B_{12}my + B_{13}d \\ Y_0 &= B_{21}mx + B_{22}my + B_{23}d \\ Z_0 &= B_{31}mx + B_{32}my + B_{33}d \end{aligned} \tag{2.7}$$

이로부터 각 카메라에 대한 카메라중심(X_0, Y_0, Z_0)과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메라로부터 구해진 직선방정식을 공선의 조건을 이용하여 구하게 된다.

즉, Fig. 2.3에서와 같이 공간상의 입자 P점에 대해 각각의 카메라는

$$P(X, Y, Z) = P(a_1t + X_0, a_2t + Y_0, a_3t + Z_0) \tag{2.8}$$

와 같은 직선의 방정식을 가진다. 즉 두 대의 카메라로부터의 직선방정식은

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \\ B(X, Y, Z) &= B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23}) \end{aligned} \tag{2.9}$$

와 같다. 이 두 직선에 대한 최단거리를 가지는 t, s는 다음과 같다.

$$t = \frac{\varkappa - \alpha\beta}{1 - \alpha^2}, \quad s = \frac{\varkappa\alpha - \beta}{1 - \alpha^2} \tag{2,10}$$

단, $\alpha = a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23}$

$\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{12}(b_{12} - b_{22}) + a_{13}(b_{13} - b_{23})$

$\varkappa = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23})$

식(2,10)을 이용하여 t, s가 구해지면 $A(X, Y, Z)$, $B(X, Y, Z)$가 결정되어 진다. 여기서 입자의 위치, $P(X, Y, Z)$는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \tag{2.11}$$

각 입자에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 입자와 하나의 3차원 위치를 결정할 수 있게 된다.

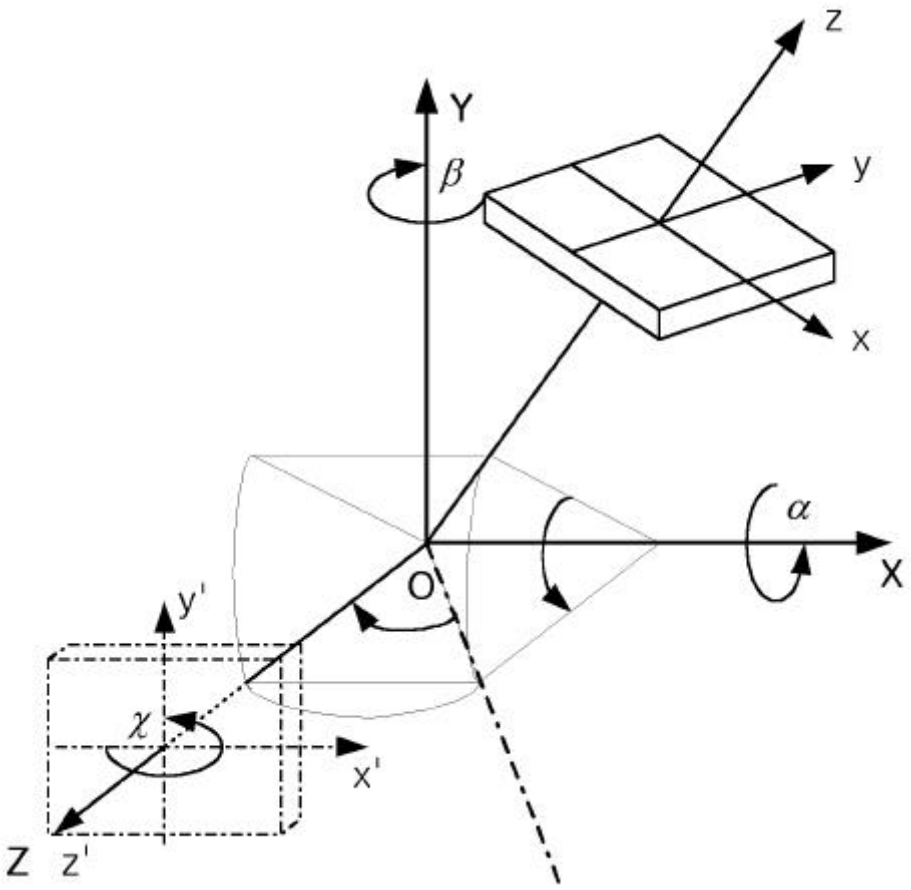


Fig. 2.1 Rotation by X, Y and Z axis.

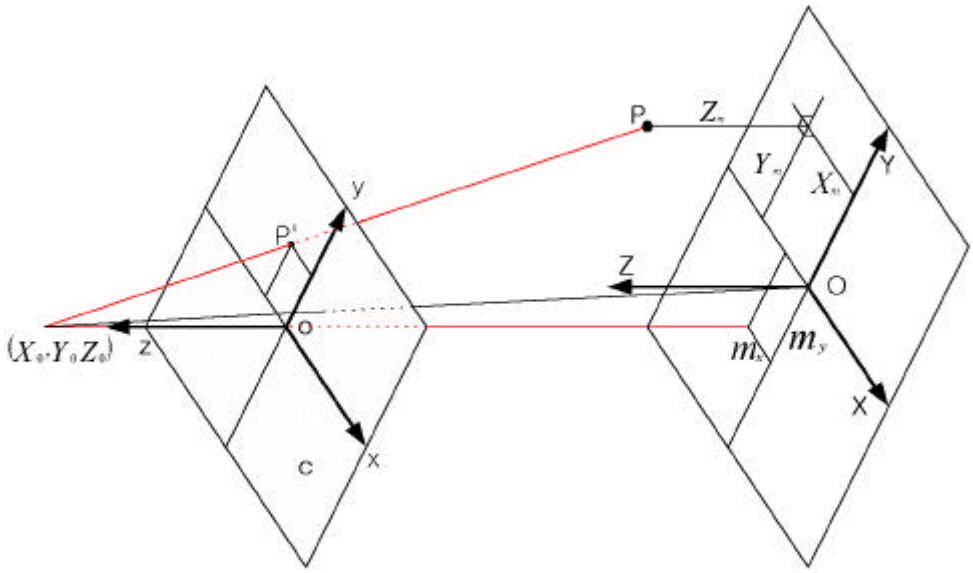


Fig. 2.2 Relations between absolute and camera's coordinate system.

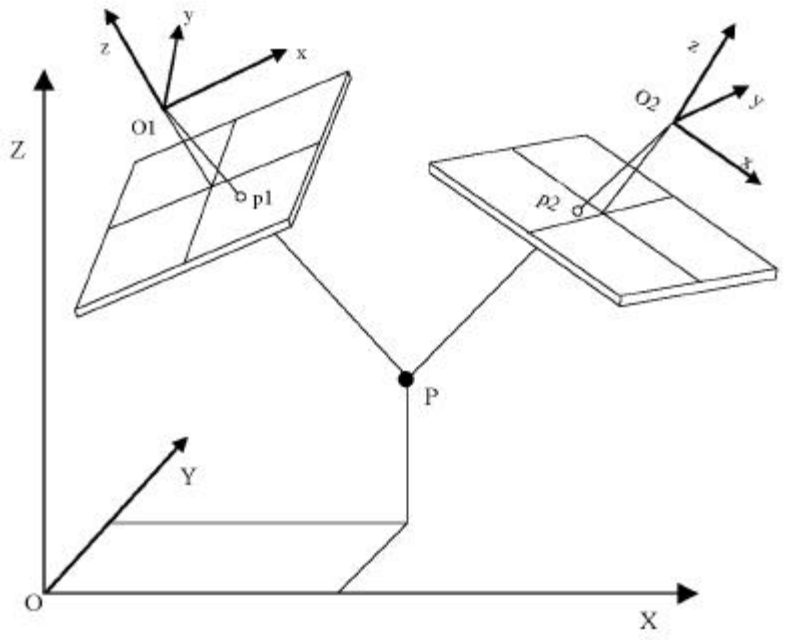


Fig. 2.3 Definition of 3-D particle position.

제 3 장 유전자 알고리즘(GA)의 적용

3.1 일반적인 유전자 알고리즘

GA를 사용하기 위해서 주어진 문제의 특성을 잘 반영할 수 있는 일정한 형태의 자료 구조가 필요하게 되는데 일반적으로 유전자(gene)는 하나의 비트로, 염색체(chromosome)는 유전자들로 구성되는 집합, 염색체로 이루어진 집합을 집단(population), 그리고 조상과 자손을 나타내는 세대(generation)등이 있다. GA에서 각 염색체는 후보해나 잠재해를 의미하며 개체(individual)라고도 한다.

주어진 문제가 추구하는 목표는 목적 함수(object function)로 나타내어지며 이를 적합도 함수(fitness function)또는 평가 함수라고도 하며, 이러한 목적함수에 의해 각 염색체 또는 개체들의 우성과 열성을 판단하게 된다. 초기 개체 집단으로부터 최종해에 접근시키기 위해 수행되는 과정을 유전연산자라 하는데 유전연산자에는 대표적으로 선택, 교배, 돌연변이가 있고, 그 이외에 이주, 격리, 재생산 등을 사용하기도 한다.

주어진 문제에 대해 GA를 적용하기 위해 다음과 같은 5가지 요소를 정해야만 한다.

1. 문제의 해가 될 가능성이 있는 것의 유전자적 표현 방법
2. 해가 될 가능성이 있는 것들의 초기 개체집단을 만들어 내는 방법
3. 환경의 역할을 수행하는, 즉 “적합도”에 의해 해를 평가하는 목적 함수
4. 자손의 합성을 변화시키는 유전 연산자들
5. 유전자 알고리듬이 사용하는 여러 가지 매개변수의 값
   (개체집단의 크기, 유전 연산자를 적용시키는 확률 등)

3.2 PTV에서의 유전 알고리즘

기존의 방법에서는 3차원 위치 결정시 두 대의 카메라로부터 입력된 영상을 기

준으로 하여 입자에 대한 공선의 조건식에서 오차가 제일 작은 입자들을 같은 입자라고 인식하게 된다. 이러한 사실을 입자의 수가 비교적 적을 때 잘 들어 맞음을 알 수 있었다. 그러나, 실질적으로 입자가 많아질 경우 입자에 대한 카메라 중심으로부터의 직선은 다른 카메라에서 하나의 직선으로 나타나게 되고, 이 직선과 만나는 입자들의 개수도 증가 하게 되면서, 이러한 방식은 조그만 입자중심의 오차에도 완전히 다른 결과를 얻게 된다. 이러한 결과는 1-Frame 3-D PTV 계측법의 알고리즘 검증에서 확실하게 알 수 있었다.

본 연구에서는 이런 잘못된 결과를 수정하기 위해 같은 입자를 인식하는 과정에 유전알고리즘을 적용한 것으로 유전알고리즘의 적용은 다음과 같다.

3.2.1 유전자적 표현 방법

PTV에서 3차원 속도 벡터 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 입자로부터 얻어진 공간 좌표이다. 따라서 3차원 속도 벡터는 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. 이것으로부터 다음과 같은 염색체를 정의하였다.

Table 3.1 Definition of chromosome with respect to camera.

Camera 1		Camera 2		Fitness	
Start point	End point	Start point	End point	3D Error	Continuity

여기서 카메라에 대한 시점과 종점은 각 영상에 대한 입자의 중심값을 나타내는 정수값이고, 3D Error는 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리를 나타낸다. 즉 하나의 입자에 대한 3차원 위치결정시 오차는 식(3.1)과 같고, 3차원 속도 벡터에 대한 위치결정시 오차는 식(3.2)와 같이 표현된다.

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \tag{3.1}$$

$$3DE = [\overline{D_s + D_e}] \tag{3.2}$$

단, D_s : 3차원 속도벡터의 시점의 오차

D_e : 3차원 속도벡터의 종점의 오차

유체의 연속성(Continuity)에 관해서는 3.2.3의 목적함수에서 자세히 설명되어 있다.

3.2.2 초기 개체의 결정

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체 유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못한다. 따라서 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러개의 후보 중 하나를 벡터로 선택한다. 이러한 과정을 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한다. 다음 과정은 임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡터는 시점과 종점에 대한 공간상의 $3DE$ 값을 가지게 된다. 이렇게 생성된 집단을 이용하여 여러 가지 유전연산자를 반복 적용함으로서 원하는 결과에 접근시키게 된다.

3.2.3 목적함수의 설정

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소라 할 것이다. 본 연구에서는 국소영역안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는 조건으로부터 PIV에서의 오류 벡터의 검출은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f &= \frac{-3u(i,j) + 4u(i+1,j) - u(i+2,j)}{2\triangle x} \\
\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f &= \frac{-3v(i,j) + 4v(i,j+1) - v(i,j+2)}{2\triangle y} \\
\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b &= \frac{u(i-2,j) - 4u(i-1,j) + 3u(i,j)}{2\triangle x} \\
\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b &= \frac{v(i,j-2) - 4v(i,j-1) + 3v(i,j)}{2\triangle y}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

PIV에서 구해진 속도로부터 식(3.3)을 이용하여 하나의 속도 벡터를 기준으로 한 주어진 4영역의 속도 발산치는 식(3.4)와 같으며, 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터를 판정하게 된다.

$$D_1 = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f \right| \qquad D_2 = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b \right|$$
$$D_3 = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b \right| \qquad D_4 = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f \right| \tag{3.4}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 (D_1, D_2), 혹은 (D_2, D_4)는 임의의 역치 D_M을 초과하게 되면 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건의 성질상 복수의 정보를 사용하기 때문에 오류벡터에 인접한 정상벡터를 이상치로 오판하거나, 와류가 발생하는 부분 등과 같이 흐름의 변화가 큰 곳에서는 정상벡터를 이상치라고 오판할 가능성이 높다. 이러한 오판정을 최대한 줄이기 위해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정하는 식(3.5)와 같은 방법을 사용한다.

$$D(i,j) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} \right| \tag{3.5}$$

단, $\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} = Min\left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f , \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b \right\}$

$\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} = Min\left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f , \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b \right\}$

즉 $D(i,j)$가 역치값 D_M을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 된다. 식(3.5)를 3차원에 적용하면 식(3.6)과 같이 표시할 수 있다.

$$D(i,j,k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z}\right]_{min} \right| \tag{3.6}$$

그러나, 유전알고리즘을 사용한 PTV 계측에서 초기에 모든 속도 값이 임의적으로 가정되었고, 일정한 격자를 가지지 않았기 때문에 속도 변화치가 상대적으로 변화가 큼을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 위 식을 다음과 같

이 고려하게 되었다.

ⓐ 연속의 식을 적용하기 위해 판단하고자 하는 벡터의 시점과 종점이 가까운 주위 벡터를 선택한다. 경험을 통해 선택영역이 좁으면 알고리즘의 수렴에 충분한 영향을 주지 못하고, 선택영역이 넓으면 주위의 에러벡터 영향이 커짐을 알 수 있었으며, 이러한 점을 고려하여 주위의 10개의 벡터를 주위 벡터로 선택하는 방식을 택하였다.

ⓑ PTV에서는 벡터와 벡터사이에 어떤 일정한 간격이 존재하지 않으므로 차분식은 1차식으로 표현되었다.

ⓒ 최종적으로 적합도는 다음과 같이 정의되었다.

$$C = \left|\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{min} + \left|\frac{\partial v}{\partial y}\right|_{min} + \left|\frac{\partial w}{\partial z}\right|_{min} \tag{3.7}$$

의미상 주위 벡터와 속도 변화량이 제일 작은 즉 벡터가 연속의 식을 만족하는 정도에 따라 주위 벡터와 유사한 분포를 가지면 C는 작은 값을 가지며 상대적으로 그렇지 못한 개체들의 C는 높은 값을 가지게 된다.

본 연구에서 $3DE$와 C가 낮은 개체들이 높은 적합도를 가지게 된다. 이러한 적합도는 유전 연산자들에 의해 사용되어지는데, 적합도를 둘로 나눈 것은 이러한 적합도가 서로 다른 역할을 하기 때문이다. 자세한 것은 유전 연산자에서 설명하기로 한다.

3.2.4 유전연산자의 사용

본 연구에서는 유전 연산자로 격리(isolation), 이주(migration), 교배(crossover) 및 재생산(reproduction)을 사용하였다. Fig. 3.1은 유전연산자를 설명하고 있고, Fig. 3.2는 본 연구에 쓰인 유전 알고리즘의 순서도이다.

하나의 염색체는 각 이미지에 대한 1개의 입자 총 4개의 입자가 임의적으로 선택되어지고 이러한 선택에 대한 $3DE$ 값을 가지게 된다. 이러한 $3DE$ 값을 기준으로 유전 연산자중 격리(isolation)를 적용하게 된다. 격리는 열성인 개체

를 집단에서 배제하는 연산자로서 주어진 최대 오차를 넘는 모든 개체를 집단으로부터 배제하게 된다.

격리 연산 후 다시 살아남은 개체들로부터 3차원 속도에 대한 연속성을 적용한 C적합도를 계산하게 된다. 이러한 C를 기준으로 열성으로 판단된 벡타들에 대해서는 다시 재생산(reproduction)을 하게 된다. 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 종점에 대한 임의적 선택을 수행한다.

위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정한 상태에서 $3DE$를 기준으로 하여 객체간의 대응되는 카메라간의 데이터를 바꿈으로서 이루어진다. 교배된 개체의 $3DE$가 한계값을 넘을 경우 이 입자 또한 배제하게 된다.

위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체생성과 같은 과정을 수행하여 선택된 집단으로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration)연산이다.

본 연구에서는 $3DE$의 한계값을 0.5, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10 15세대(반복횟수)를 사용하였다.

참고로 본 연구에서는 유전 알고리즘의 대표적인 연산자인 돌연변이를 사용하지 않았는데 그 이유는 돌연변이의 역할이 국부적인 해의 수렴을 막기 위한 것이므로, 수렴속도를 높이기 위해 초기에 입자의 후보집단을 선정해 두고 개체의 생성은 그 안으로 제안하여 격리 및 이주 연산자 만으로도 충분한 해를 구할 수 있었기 때문이다. 실질적으로 돌연변이의 개념을 넣어보았으나 계산시간만이 증가했을 뿐 결과에 아무런 영향이 없음을 확인하였다.

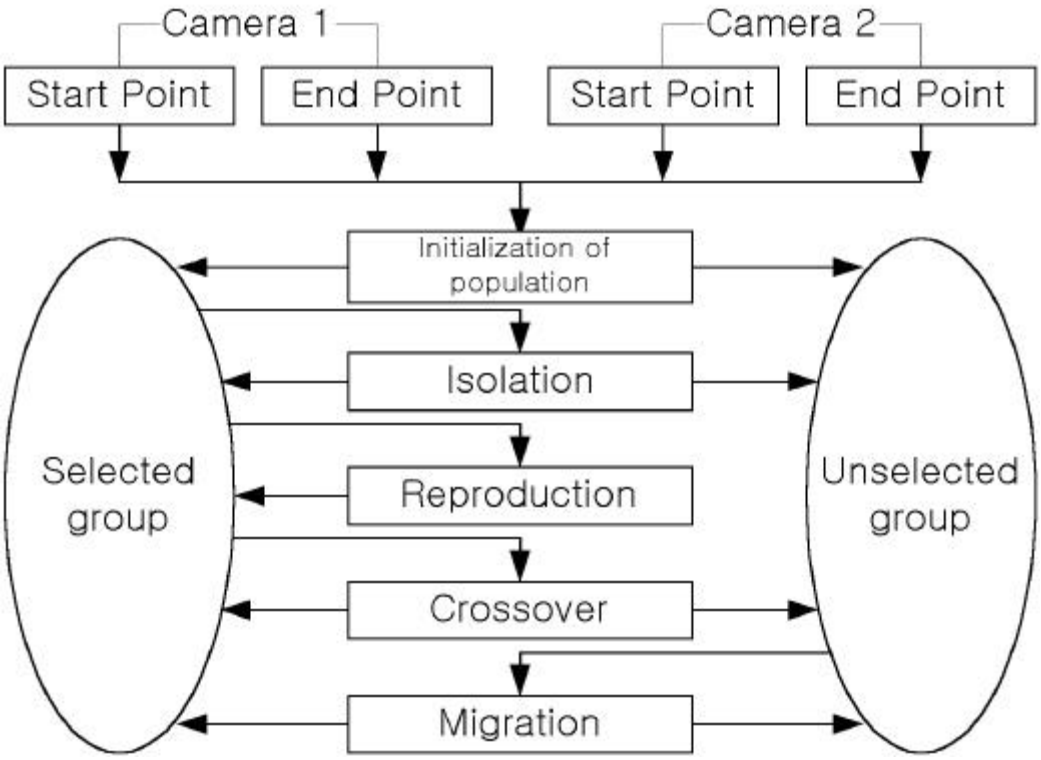


Fig. 3.1 Definition of GA Calculator in PTV.

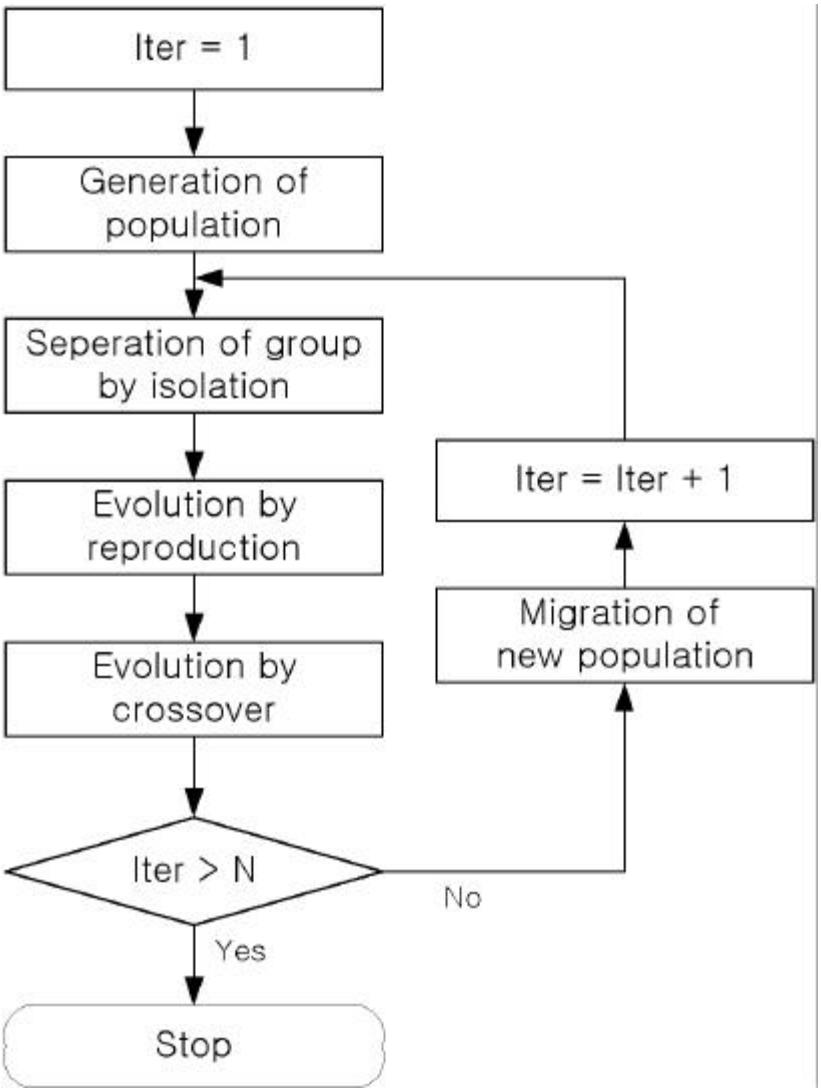


Fig. 3.2 Flowchart of GA in PTV.

제 4 장 가상영상에 의한 성능평가

4.1 가상영상의 구현

Willert and Gharib(1991)은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상(32×32 pixel의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8 pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8 pixel)을 제시했으며, Okamoto et al.(1999)은 젯트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획(PIV-STD3D)을 제시했다.

본 연구에서 유전알고리즘의 성능을 평가하기 위해 채널유동의 LES(Large Eddy Simulation) 데이터 및 Okamoto et al.(1999)이 제시한 3차원 충돌 제트 유동의 데이터를 이용한 가상영상을 도입하여 알고리즘의 성능을 평가하였다. 더불어 본 연구에서 사용된 관측방정식과 기존의 관측방정식을 가상영상 및 실제 영상에 적용되었다.

본 연구에서 생성된 이미지의 해상도는 (512×512)pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다. 각 입자에 대한 밝기는 입자의 중심을 기준으로 하여 다음과 같은 식을 사용하였다.(기존의 방식을 그대로 적용하였다.)

$$I(X, Y) = I_0 \, \mathrm{Exp}\left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2} \right) \tag{4.1}$$

단, $I_0 = 240 \, \mathrm{Exp}\left(- \frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2} \right)$

입자의 직경(d_p) 0.3mm(약 3 pixels)을 기준으로 하였으며, 조명의 직경(σ_l)은 600 pixel을 적용하였으며, 입자의 개수는 Doh et al.(1999)의 연구를 기준으로 하여 50에서 2000개를 사용하였다.

먼저 카메라의 정보를 얻기 위해 모든 카메라에 대한 교정작업을 해야 한다.

본 연구에서는 Fig. 4.1의 교정기(약 -50 50mm, -50 50mm, 0 50mm)를 사용하여 가상 및 실제에 대한 교정작업을 하였다. Table 4.1은 교정기의 절대 좌표값을 나타내며 교정기의 적용범위는 Fig. 4.2와 같다.

Fig. 4.2는 가상영상의 구현을 위한 카메라의 위치를 나타내고 있다. 각각의 카메라는 유동 방향과 직각인 방향에 놓여졌으며, 관측영역은 교정기가 가상영상의 중심에 오도록 위치해 있다. Fig. 4.3은 이러한 과정으로 생성된 교정기에 대한 가상영상을 보여주고 있다.

3차원 공간 및 속도를 계측하기 위해서 먼저 카메라의 정보를 구하는 교정작업을 해야 한다. 본 연구에서는 Doh et al.(1999)의 연구를 기준으로 계산상의 2차원 좌표를 이용한 이상적인 교정작업(IH)과 임계값을 이용하여 도심을 구한 실험에 적용되는 교정작업(RH)으로 분리하였다. Table 4.2는 11개의 표정요소에 대한 IH, RH와 10개의 표정요소에 대한 IH, RH의 가상영상에 대한 카메라 3번의 결과 및 카메라 2와 3의 공선의 조건으로부터 구한 공간상의 결과를 보여 주고 있고, Table 4.3 은 실제 교정기를 사용한 교정작업 결과를 보여주고 있다. 이러한 교정작업의 자세한 결과들은 부록으로 첨부하였다.

Table 4.2에서 x가 π만큼의 차이를 가지는 이유는 관측방정식에서 초점거리 c의 부호가 서로 상이한 이유이다. 즉 11개의 표정요소에는 $-c$를 사용하고 10개의 표정요소에서는 c를 사용하는 차이에서 나오는 결과이다. 이러한 점을 고려하면, 두 개의 관측방정식 모두 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나, RH에서 보면 공간상의 오차가 11개의 표정요소에 대해 상당히 증가함을 알 수 있었으며, 입자의 중심이 결과에 많은 영향을 미치는 PTV 방법에서는 기존의 11개의 표정요소보다 10개의 표정요소에 의한 방법이 더 타당한 것이라 생각된다.

Table 4.3은 교정기에 대해 실제 카메라 교정작업을 한 결과로 카메라 1은 38개, 카메라 2에서는 40개 그리고, 카메라 3에서는 42개의 입자중심을 찾았다. 같은 영상을 가지고 구한 카메라 정보지만 관측방정식에 따라 그 결과가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 먼저 카메라 2 와 카메라 3의 결과를 보면 10개의 표정요소가 Z값에 대한 오차는 증가했지만, X, Y 값의 오차량이 줄

었으며, 전체적으로 적은 오차량을 보여주고 있다. 카메라 1과 카메라 3에 대해서는 오차량이 상대적으로 큰데 이것은 실험시 카메라의 초점이 흐린 것이 그 이유로 생각되며, 3차원 계측에서의 카메라의 초점 정도가 계측 결과에 상당한 영향을 미침을 알 수 있었다.

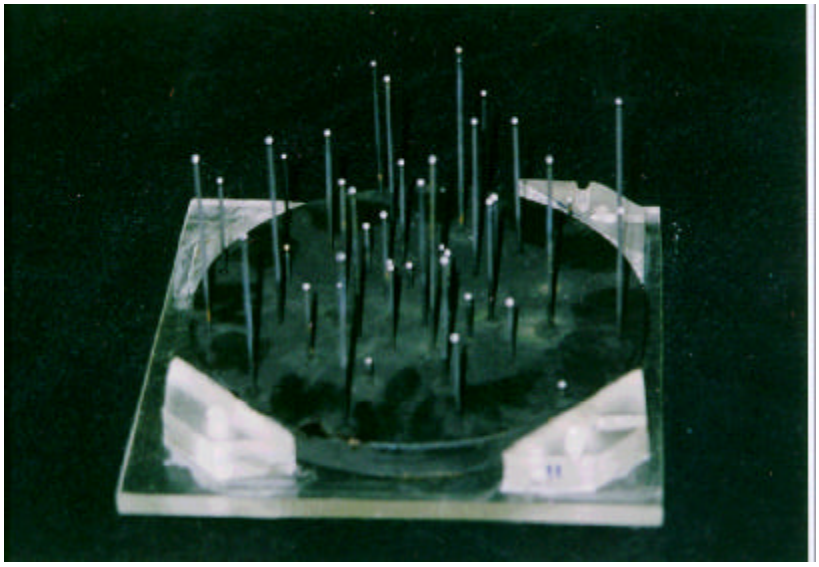


Fig. 4.1 Picture of Calibrator.

Table 4.1 Absolute coordinate of calibrator(㎜)

No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	0.2000	-7.7516	6.5188	22	33.3205	0.5987	4.9782
2	7.3386	-3.8389	13.0829	23	28.9298	16.9216	46.4743
3	7.1826	4.8918	17.0283	24	16.8530	28.6673	17.4736
4	0.5809	8.7543	39.7021	25	1.0476	33.2205	34.1831
5	-6.5406	4.1629	15.9084	26	-16.4029	28.8808	6.6368
6	-6.3076	-3.2634	24.5248	27	-28.1422	16.8719	20.8206
7	0.8383	-17.7463	29.0704	28	-32.6023	0.2917	50.4479
8	10.2142	-15.4834	21.4611	29	-28.1175	-16.3255	10.1926
9	16.9448	-8.9227	43.1246	30	-15.1312	-28.3268	33.2271
10	19.4009	0.6626	27.9001	31	0.2715	-50.0334	38.2043
11	16.5258	9.0808	32.3592	32	26.4238	-42.7926	30.1636
12	9.5821	16.4280	12.0234	33	43.8331	-24.4106	8.3207
13	1.5498	18.9168	51.5761	34	49.4580	0.0109	49.4652
14	-8.4680	16.7006	22.9841	35	43.6475	25.3076	36.0622
15	-15.4715	9.6417	40.2301	36	25.5517	44.0473	3.8494
16	-18.1874	0.4146	8.9176	37	-0.3152	49.9450	24.9162
17	-15.0978	-8.5400	31.5309	38	-23.8146	43.8323	45.7507
18	-8.5938	-15.6116	13.8650	39	-42.7111	25.3380	42.0268
19	0.6080	-32.7680	43.4187	40	-49.5878	0.0228	47.8234
20	17.1421	-26.7340	52.5382	41	-42.0264	-24.9213	25.8710
21	28.1973	-15.8846	37.8964	42	-24.1197	-43.0299	19.1620

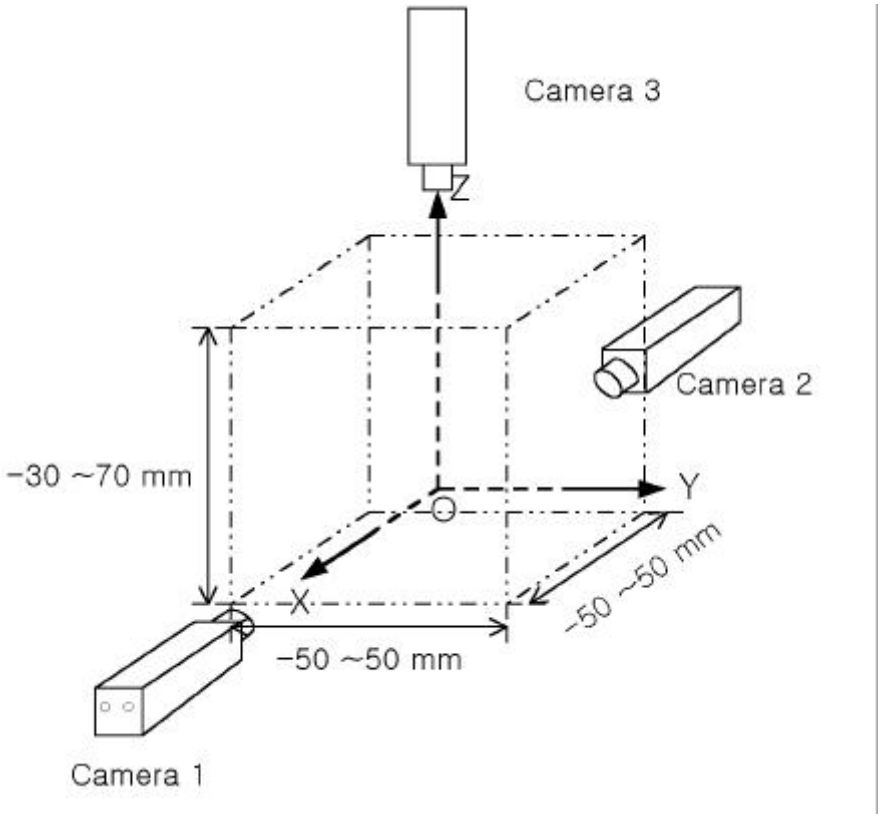


Fig. 4.2 Camera arrangement for the generation of virtual images.

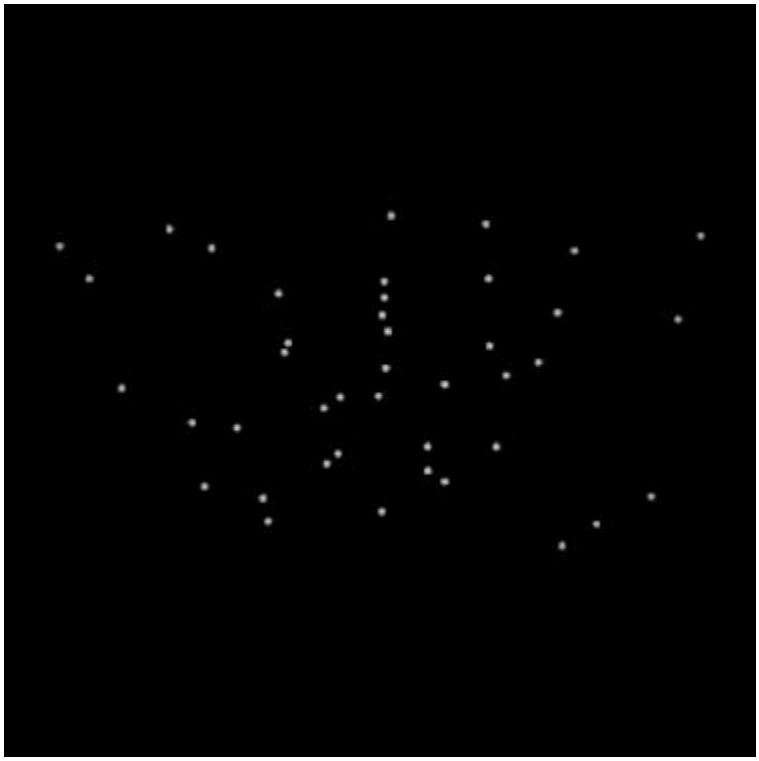


Fig. 4.3a Virtual image of calibrator viewed by camera 1.

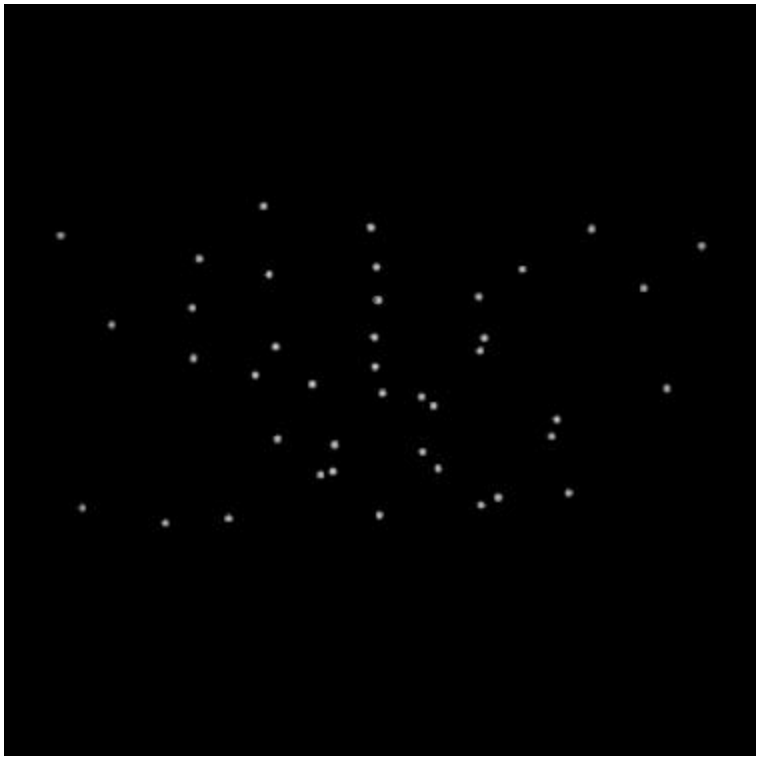


Fig. 4.3b Virtual image of calibrator viewed by camera 2.

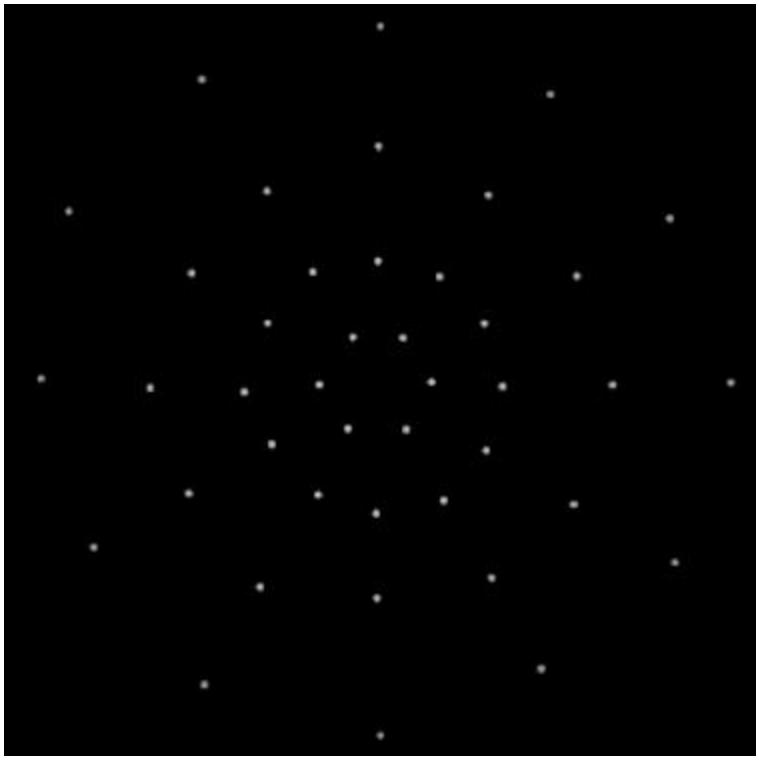


Fig. 4.3c Virtual image of calibrator viewed by camera 3.

Table 4.2 Result of virtual calibration.

Parameter		IH (11 parameter)	RH (11 parameter)	IH (10 parameter)	RH (10 parameter)
X_0(mm)		0.0000	0.0105	0.0000	0.0001
Y_0(mm)		0.0000	0.0073	0.0000	0.0000
Z_0(mm)		499.9997	500.0433	500.0000	500.0002
α(°)		0.0000	- 0.0082	- 0.0000	- 0.0000
β(°)		- 0.0000	0.0095	0.0000	- 0.0000
$\varkappa$(°)		0.0000	- 0.0001	- 180.0000	- 180.0000
c(pixel)		- 2199.9992	- 2200.2813	2200.0000	2200.7257
Average Error	X	0.00	0.00	0.00	0.00
	Y	0.00	0.02	0.00	0.00
	Z	0.00	0.01	0.00	0.00
Standard deviation	X	0.00	0.00	0.00	0.00
	Y	0.00	0.03	0.00	0.00
	Z	0.00	0.01	0.00	0.00

Table 4.3 Result of real calibration.

Para-meter	(11 parameter)			(10 parameter)		
	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 1	Camera 2	Camera 3
X_0	298.2380	-294.3097	21.2176	312.0200	-300.3900	21.3160
Y_0	590.6079	-636.8735	1.7067	617.0300	-650.7100	0.7413
Z_0	19.6709	28.7552	715.6505	19.0050	28.7400	730.6800
α	83.8680	-98.9806	9.4330	-93.4833	92.8993	-1.9217
β	-0.5757	0.1542	-1.3937	62.9341	-65.2117	-0.0985
κ	27.6702	24.3260	-784.2893	-87.4470	92.5015	-64.3059
c	-2922.2584	3310.1608	2989.1971	3129.8967	3451.7704	3138.2377

		Camera 1, 3	Camera 2, 3	Camera 1, 3	Camera 2, 3
평균오차	X	0.05	0.05	0.09	0.04
	Y	0.09	0.07	0.03	0.02
	Z	0.34	0.04	0.13	0.07
표준편차	X	0.07	0.06	0.20	0.05
	Y	0.12	0.11	0.05	0.03
	Z	1.27	0.05	0.16	0.09

4.2 채널 및 제트유동의 가상영상

본 연구에서는 알고리즘의 성능평가를 위해 두 개의 CFD 계산 결과를 사용하였는데 하나는 채널유동은 Re_H=3300인 LES의 계산결과이고, 다른 하나는 제트유동으로 Okamoto등이 제시한 데이터를 사용하여 가상영상을 구현하였는데 사용된 데이터들은 교정기의 영역을 기준으로 하여 (-50 50, -50 50, -30 70)mm로 확대 및 이동하였다. 입자들은 임의적으로 50에서 2000개까지 발생시켰으며, 계측의 시간간격을 조정할 수 있는 AOM(Acousto Optical Modulator) 방식을 기준으로 입자의 최대 이동거리를 10pixel보다 작도록 설정하였다.

PTV에 의한 3차원 속도 계측방법에 있어서 입자의 중심에 의한 영향이 상당히 크므로 본 연구에서도 Doh et al.(1999)의 연구에서 사용했던 방법대로 계산상의 2차원 좌표를 이용한 이상적인 입자중심(IK)과 임계값을 이용하여 도심을 구한 실험에 적용되는 입자중심(RK)로 분류하고, Table 4.2에서 구해진 IH, RH를 이용하여 IHIK, IHRK, RHIK, RHRK의 4가지 경우에 대해 알고리즘을 적용하였다.

Fig. 4.4는 CFD의 계산결과로부터 임의적으로 발생된 3차원 속도벡터들을 보여주고 있다. Fig. 4.5는 이 벡터들의 시점과 종점을 기준으로 생성된 가상영상을 보여주고 있으며, 생성된 가상영상을 1-Frame 3-D PTV 및 유전 알고리즘을 이용한 PTV방법에 적용하였다. Fig. 4.6은 IHIK 및 RHRK에 대해 유전알고리즘으로 계산한 속도벡터를 보여주고 있는데 그림에서 볼 수 있듯이 IHIK의 경우 임의적으로 발생된 속도 분포와 계산된 속도 분포가 거의 유사함을 알 수 있으나, RHRK의 경우 결과에 에러벡터가 포함되어 있다. 이러한 에러벡터의 정도를 판단하기 위해 회복율을 다음과 같이 정의하였다.

$$R_R = \frac{V_R}{V_G} \times 100 \tag{4.2}$$

단, R_R : 회복율(%)

V_R : 회복된 벡터중 오차가 0.1mm보다 작은 벡터

V_G : 임의적으로 생성된 벡터

Fig. 4.7은 채널유동에 대해 Doh et al.(1999)의 11개의 표정요소를 사용한 1-

Frame 3D PTV 연구결과(11)와 10개의 표정요소를 사용한 1-Frame 3D PTV 결과(10) 및 유전 알고리즘(GA)을 이용한 3D PTV방법에 의한 결과중 IHIK, RHRK를 그래프로 표시한 것이다. IHIK에 대해서 입자의 개수가 2000개일 때 1-Frame 3-D PTV방법은 99%이상의 높은 결과를 보여주고 있으나 상대적으로 유전 알고리즘은 97.1%의 비교적 낮은 회복율을 보였다. 반면 RHRK에 대해서 입자의 개수가 2000개 일 때 기존의 연구결과에서는 15.3%를 보였고, 10개의 파라미터를 사용했을 때에는 35.6%를 보였으며, 유전 알고리즘을 사용했을 경우 56.4%의 회복율을 보였다. Fig. 4.8은 3차원성이 강한 충돌 제트유동에 대한 가상영상의 결과를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 채널유동과 거의 유사한 결과를 보이고 있으며, 이로부터 GA에 의한 3차원 PTV방법이 난류유동에도 적합한 결과를 보임을 알 수 있었다.

여기서 IK에 비해 RK의 회복율이 급격히 떨어지는 이유는 3차원 공간이 카메라의 2차원 평면으로 변환될 때 입자들이 서로 겹침으로서 사라지거나 입자의 중심값 자체에 오차를 가지기 때문이다. Fig. 4.9는 이러한 입자들의 겹침에 의해 사라진 입자를 퍼센트로 표시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 입자의 개수가 2000개 일 때는 약 15%, 300개정도의 입자가 사라지게 된다. 또 3차원 위치를 결정하기 위해서는 2대 이상의 카메라가 필요하게 되므로 이러한 오차는 거의 2배 이상으로 커지게 된다. 이러한 점을 고려할 때 유전 알고리즘은 꽤 높은 회복율을 보이고 있음을 알 수 있으며, Fig. 4.7과 4.8로부터 유전 알고리즘의 최적의 입자수는 약 1000개에서 1500개 사이에 있음을 알 수 있었다.

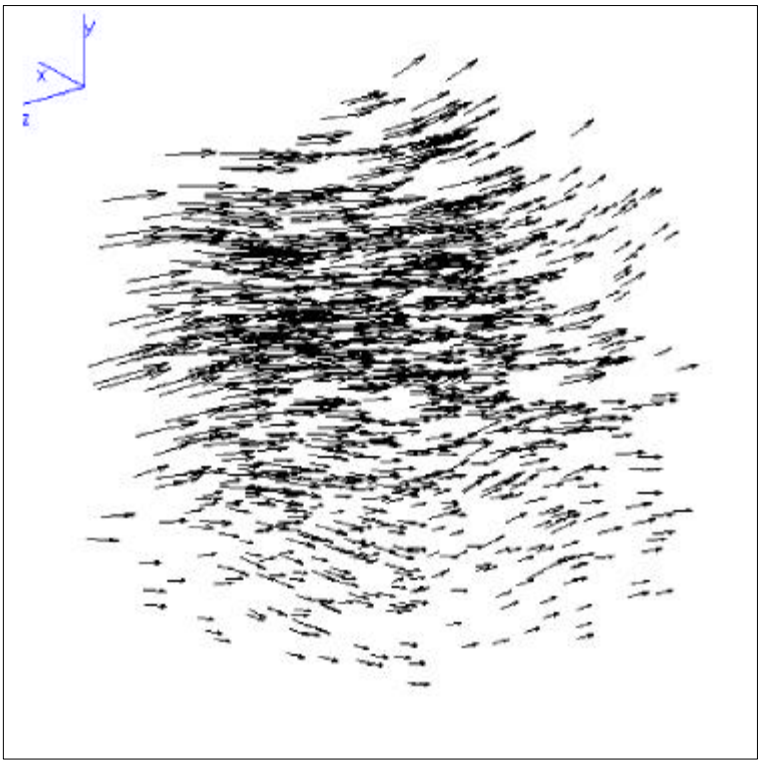
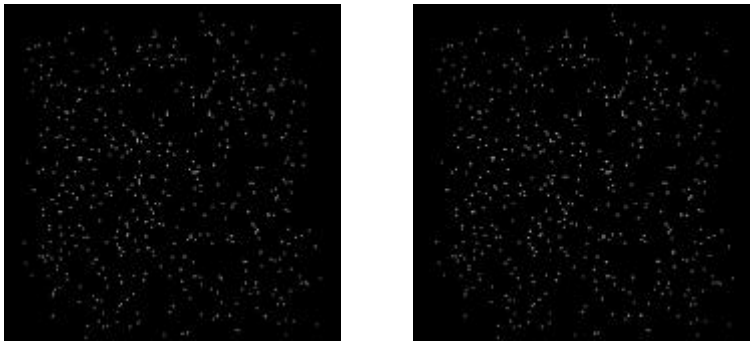
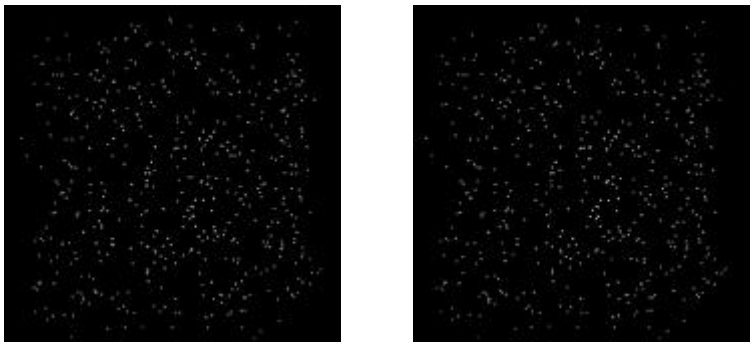


Fig. 4.4 Random velocity profile of jet flow.



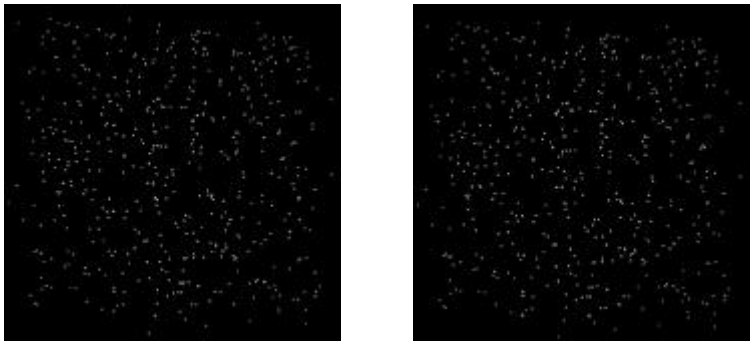
Start End

a. Camera 1.



Start End

b. Camera 2.



Start End

c. Camera 3.

Fig. 4.5 Generated virtual image.

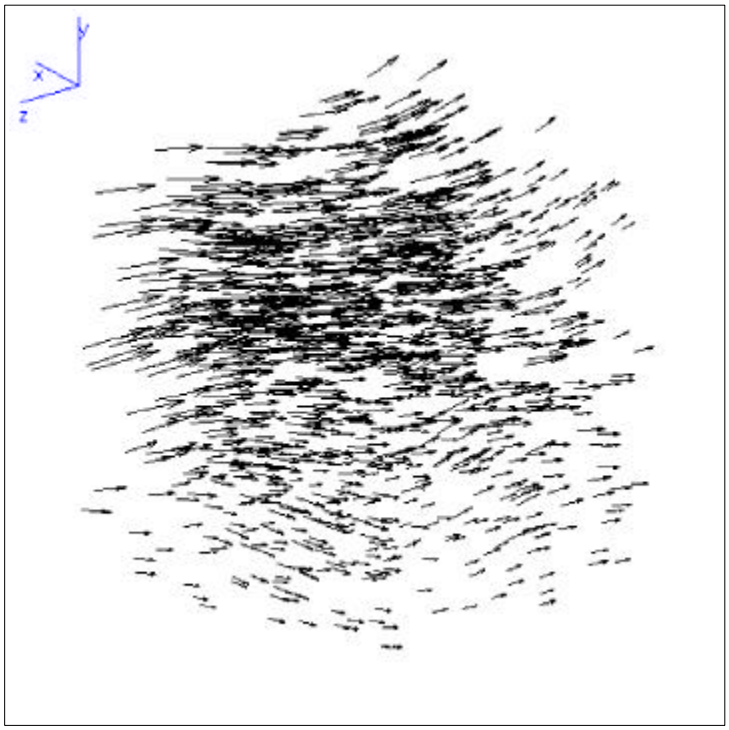


Fig. 4.6a Recovered vector by GA(IHIK).

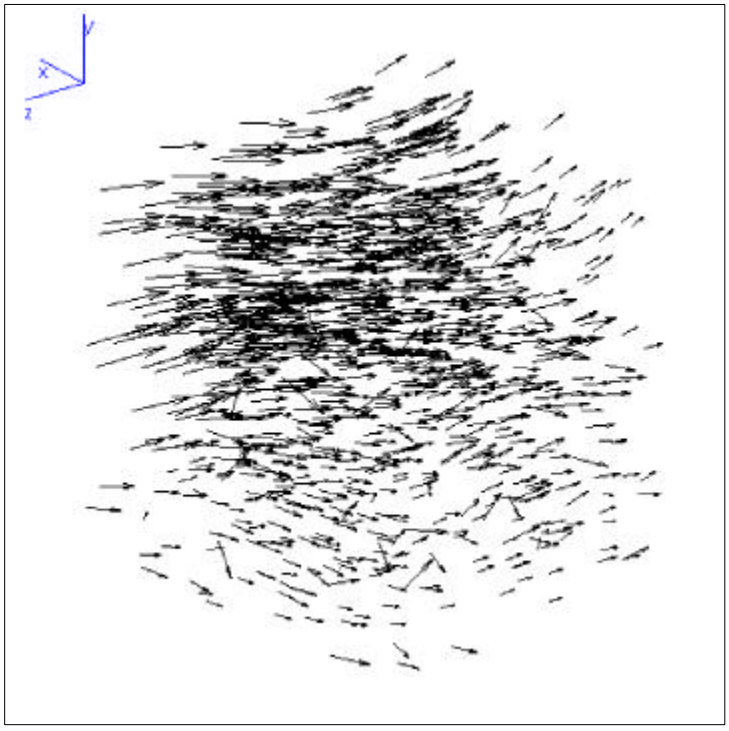


Fig. 4.6b Recovered vector by GA(RHRK).

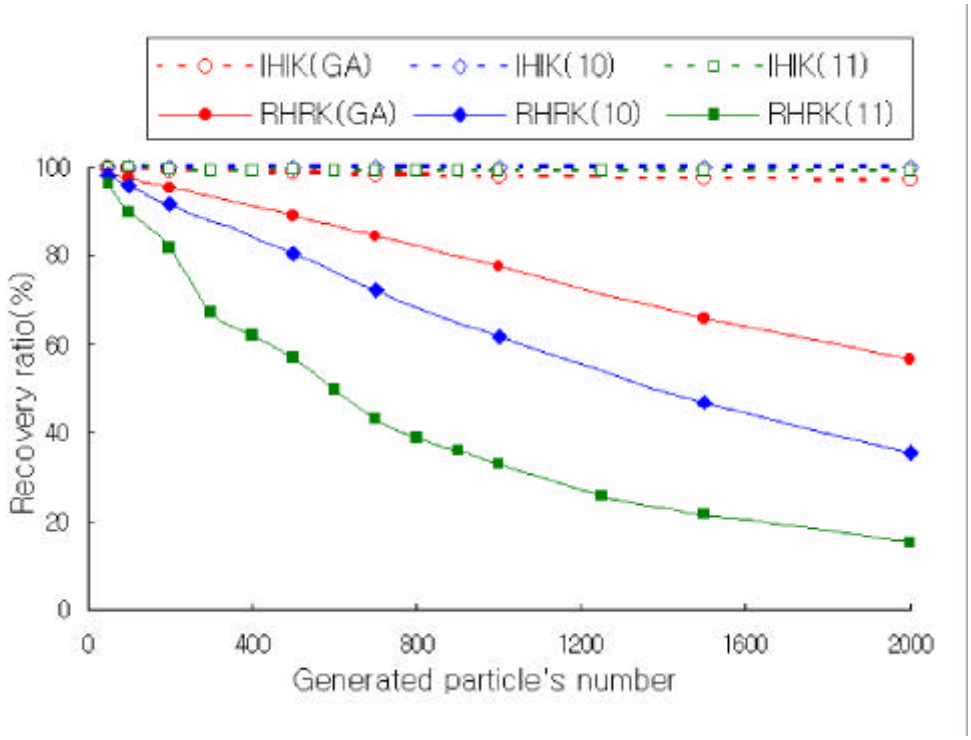


Fig. 4.7 Recovery ratio in channel flow.

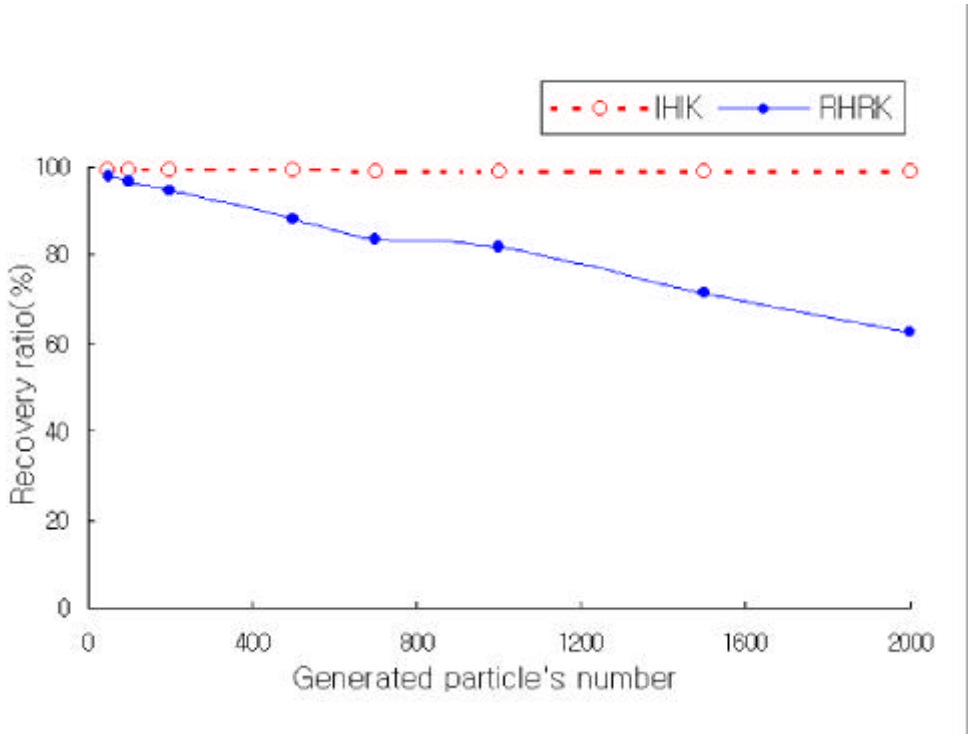


Fig. 4.8 Recovery ratio in jet flow.

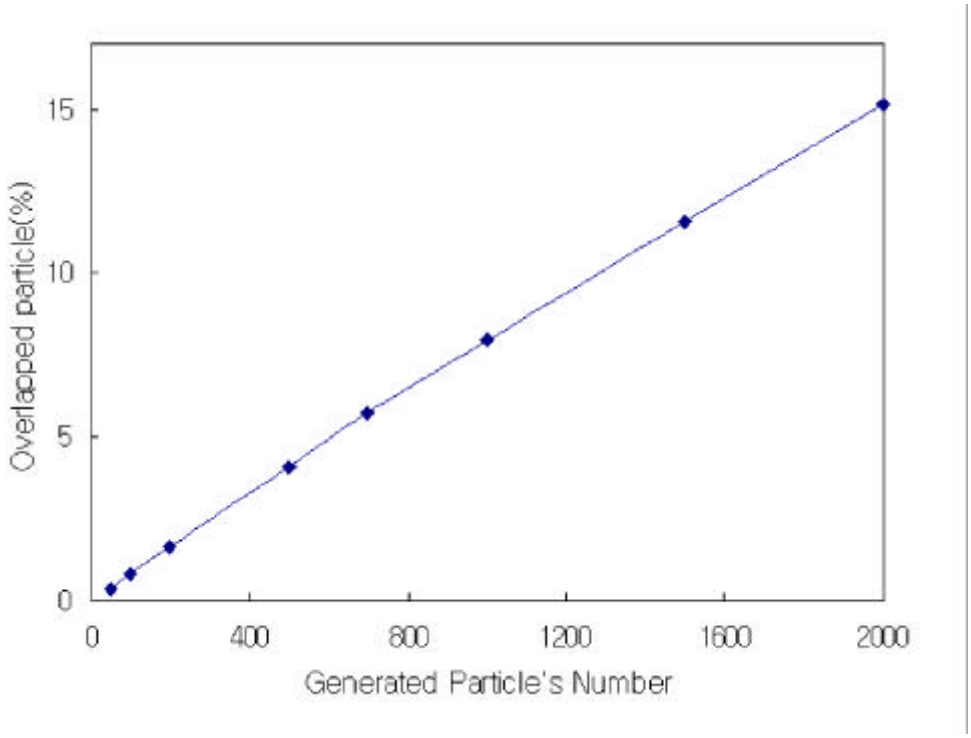


Fig. 4.9 Overlapped particle in virtual images.

4.3 계측오차의 불확실성

개발된 계측시스템의 계측오차는 여러 가지 복합적인 요인들이 있으나 계측에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 요소로서는 3차원 위치계측에서의 오차, 두 시각 사이에서의 3차원 이동거리오차, 입자의 추종성에 기인하는 오차 등으로 크게 3가지의 요인으로 나누어 질 수 있다.

카메라의 표정요소와 사진좌표간의 강한 비선형성으로 인하여 3차원 위치계측의 오차를 추정하기란 쉽지가 않다. 따라서, 3차원 위치계측에 있어서의 오차는 40개의 기준점의 절대좌표와 개발된 계측시스템으로 계측하여 얻어낸 절대좌표와의 값을 비교함으로서 정량적으로 평가하기로 한다. 즉, Table 4.4에 나타나 있는 바와 같이 기준점 절대좌표값(KjnX, KjnY, KjnZ)과 계측된 절대좌값(CalcX, CalcY, CalcZ)의 차의 표준편차, S_X, S_Y, S_Z를 X, Y, Z축에 있어서의 3차원 위치계측의 불확실성으로 보았다.

3차원 속도벡터에 대한 계측의 불확실성은 이동거리의 불확실성과 시간간격의 불확실성에 의존하는데, 시간간격의 불확실성은 카메라의 촬영시간간격에 있어서의 불확실성과 관련하고, 대개는 무시할 정도로 작다고 볼 수 있으므로, 3차원 속도벡터에 대한 계측의 불확실성은 이동거리의 불확실성에 의존한다고 보았다. 그리하여, 총체적인 속도벡터계측에 있어서의 불확실성은 다음식으로 정리될 수 있으며 그 값은 0.21mm이 된다.

$$U_{RSS} = \sqrt{(2S_X)^2 + (2S_Y)^2 + (2S_Z)^2} \tag{4.3}$$

본 연구에서의 계측영역인 X(-40 40㎜), Y(-50 50㎜), Z(0 70㎜)에 대해 카메라의 영상 두 장 사이에서의 상대적 오차는 1% 미만인 것을 알 수 있다.

Table 4.4 Errors of three-dimensional geometrical measurement

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.74 - -7.75	0.21 - 0.20	6.63 - 6.52	0.01	0.01	0.11
2	-3.81 - -3.84	7.36 - 7.34	13.11 - 13.08	0.03	0.02	0.03
3	4.89 - 4.89	7.19 - 7.18	17.14 - 17.03	0.00	0.01	0.11
4	8.76 - 8.75	0.57 - 0.58	39.68 - 39.70	0.00	0.01	0.02
5	4.16 - 4.16	-6.56 - -6.54	16.07 - 15.91	0.00	0.02	0.16
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.54 - 24.52	0.01	0.00	0.02
7	-17.72 - -17.75	0.83 - 0.84	29.10 - 29.07	0.02	0.01	0.03
8	-8.91 - -8.92	16.99 - 16.94	43.25 - 43.12	0.02	0.04	0.13
9	0.67 - 0.66	19.43 - 19.40	27.94 - 27.90	0.01	0.03	0.04
10	9.07 - 9.08	16.54 - 16.53	32.37 - 32.36	0.01	0.01	0.01
11	16.43 - 16.43	9.59 - 9.58	12.14 - 12.02	0.00	0.01	0.12
12	18.88 - 18.92	1.60 - 1.55	51.59 - 51.58	0.03	0.05	0.01
13	16.66 - 16.70	-8.50 - -8.47	23.02 - 22.98	0.04	0.03	0.04
14	9.63 - 9.64	-15.48 - -15.47	40.29 - 40.23	0.02	0.01	0.06
15	0.42 - 0.41	-18.17 - -18.19	8.99 - 8.92	0.01	0.02	0.07
16	-8.51 - -8.54	-15.11 - -15.10	31.51 - 31.53	0.03	0.02	0.02
17	-15.62 - -15.61	-8.59 - -8.59	14.01 - 13.87	0.01	0.00	0.15
18	-32.69 - -32.77	0.61 - 0.61	43.40 - 43.42	0.08	0.00	0.02
19	-26.63 - -26.73	17.14 - 17.14	52.47 - 52.54	0.10	0.00	0.07
20	-15.83 - -15.89	28.22 - 28.20	37.86 - 37.90	0.06	0.03	0.04
21	0.66 - 0.60	33.35 - 33.32	5.09 - 4.98	0.06	0.03	0.11
22	16.89 - 16.92	28.96 - 28.93	46.54 - 46.47	0.03	0.03	0.06
23	28.52 - 28.67	16.86 - 16.85	17.58 - 17.47	0.15	0.01	0.10
24	33.14 - 33.22	1.02 - 1.05	34.22 - 34.18	0.08	0.03	0.04
25	28.86 - 28.88	-16.41 - -16.40	6.77 - 6.64	0.02	0.01	0.14
26	16.83 - 16.87	-28.17 - -28.14	20.97 - 20.82	0.05	0.03	0.15
27	0.26 - 0.29	-32.61 - -32.60	50.45 - 50.45	0.03	0.01	0.00
28	-16.31 - -16.33	-28.09 - -28.12	10.37 - 10.19	0.02	0.03	0.18
29	-28.29 - -28.33	-15.09 - -15.13	33.28 - 33.23	0.03	0.04	0.05
30	-49.94 - -50.03	0.20 - 0.27	38.23 - 38.20	0.09	0.07	0.02
31	-42.73 - -42.79	26.29 - 26.42	30.31 - 30.16	0.06	0.13	0.15
32	-24.36 - -24.41	43.83 - 43.83	8.52 - 8.32	0.05	0.00	0.20
33	0.04 - 0.01	49.48 - 49.46	49.37 - 49.47	0.03	0.02	0.10
34	25.25 - 25.31	43.64 - 43.65	36.06 - 36.06	0.06	0.01	0.00
35	49.84 - 49.95	-0.34 - -0.32	24.98 - 24.92	0.11	0.02	0.06
36	43.75 - 43.83	-23.82 - -23.81	45.80 - 45.75	0.09	0.00	0.05
37	25.28 - 25.34	-42.68 - -42.71	42.07 - 42.03	0.06	0.03	0.04
38	-0.02 - 0.02	-49.58 - -49.59	47.70 - 47.82	0.04	0.01	0.12
39	-24.93 - -24.92	-42.05 - -42.03	25.88 - 25.87	0.01	0.02	0.01
40	-42.97 - -43.03	-24.08 - -24.12	19.29 - 19.16	0.06	0.04	0.12
			Average error	0.04	0.02	0.07
			Standard deviation	0.05	0.03	0.09

제 5 장 후향단 유동계측

4장에서 유전자 알고리즘에 의한 3차원 PTV방법의 가상영상에 의한 검증에서 우수한 결과를 보임을 알 수 있었다. 나아가 5장에서는 유체공학분야에서 계산코드 혹은 실험적 방법의 비교에도 자주 적용되고, 공학에서 자주 나타나는 유동의 특성을 지닌 후향단 계측에 적용하여 재부착, 재순환 및 난류 경계층 등의 유동 특성을 파악함으로서 이러한 방법이 유동장의 계측에 있어 매우 유용함을 증명하고자 한다.

5.1 계측 시스템의 구성

Fig. 5.1은 후향단 계측을 위해 본 연구에 적용된 시스템을 나타내고 있다. 계측 시스템의 구성은 3대의 CCD카메라(768×494 pixels), 이미지 그래버(512×512 pixels, 256 gray levels), 레이저(0.5W), AOM장치, 3대의 비디오, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터를 포함하고 있다.

본 계측 시스템에서는 계측 영역내의 미소입자들을 추적하는데 있어 검사영역의 시간해상도를 높이기 위하여 AOM장치를 사용한다. AOM의 펄스신호는 CCD카메라에 의해서 동기 되며, 이미지의 1프레임에 해당하는 1/30초의 짝수(1/60)와 홀수(1/60)필드 이미지 각각에 설정한 시간간격동안 레이저 광원의 노출시간을 제어한다. 이러한 원리로 레이저 광원의 노출시간을 자유로이 조절할 수 있으며, 3대의 CCD카메라와 AOM을 동기 시켜서 계측을 실시한다. 본 실험에서는 속도장이 충분히 빠르지 않아서 AOM을 사용하지 않았다.

3대의 카메라 각각에 연결되어 있는 3대의 비디오 레코더(Panasonic AG-7350, Sony SLV-RS1, SLV-595HF)를 통해 이미지가 동시에 기록되며, 이 신호는 호스트 컴퓨터에 장착된 이미지그래버(Ditect 64)로 보내져 아날로그에서 디지털로 전환되어 256gray levels(512 × 512)로 저장된다. 이미지 그래버의 메모리에 저장된 이미지를 다시 호스트 컴퓨터에 저장한다. 본 실험에서 사용되는 이미지 그래버는 64 Mega bytes의 RAM이 장착되어 있으며, 카

메라에 의해 동기 되어 R, G, B 이미지를 동시에 실시간으로 64장씩 저장 할 수 있다.

저장된 이미지로부터 하나의 프레임을 두 개의 필드로 분리하고, 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계값에 의한 이치화한 다음 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 면적모멘트 공식, 식(5.1)에 의해 입자의 중심을 결정한다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad , \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=0}^{n} A_i y_i}{\sum_{i=0}^{n} A_i} \tag{5.1}$$

결정된 입자의 중심으로부터 카메라의 교정작업을 실행하여 카메라의 정보를 구하고, 유전 알고리즘을 적용하여 최종적인 3차원 벡터를 결정한다. 본 연구에서는 충분한 속도벡터를 얻기 위하여 10회 반복실험을 통하여 약 80만개의 속도벡터를 얻었다.

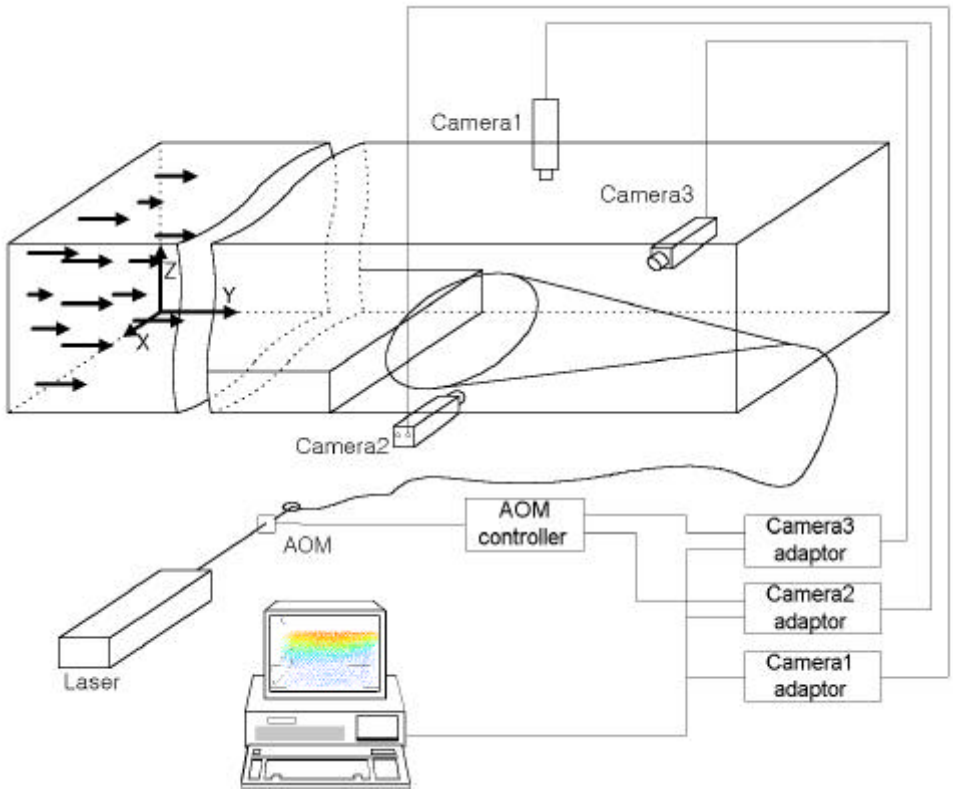


Fig. 5.1 System of Particle tracking velocimetry in GA.

5.2 실험조건 및 계측결과

Fig. 5.2는 후향단의 계측영역을 보여주는 것으로 사용된 수조는 개수로 시험장치(Model : HW13, HONGIK FLUIDS Co.)로 크기는 250×75×2400 ㎜³이며, 유동장의 입구로부터 1820mm 지점에 후향단을 설치하여 유동이 충분히 발달할 수 있도록 하였으며, 카메라는 물과 공기와 아크릴의 굴절에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 유동장의 좌, 우 및 상방향에 수직이 되도록 설치하였다.

3차원 계측을 위하여 교정기의 Y축이 유동장 방향이 되도록 교정기를 설치하고, 카메라의 교정작업을 수행하였다. 카메라 교정작업을 위해 사용된 교정기 및 교정기의 절대좌표값은 부록(Fig. A5.1, Table A5.1)으로 첨부하였으며, 교정기의 데이터부터 계측영역은 (-35 35mm, -50 50mm, 0 70mm)이다.

카메라의 교정작업을 마친 후 추적입자(나일론 12, 비중 1.02)를 유동장에 투입한 후 Ar-ion 레이저 (0.5W)의 광원을 관측영역 전체에 걸쳐 조사하였다. 본 연구에서 후향단의 높이 H는 0.02 m, 평균속도는 약 0.055 ㎧, Re_H = 1100이였다.

Fig. 5.3은 후향단으로부터 -1H 지점에서의 평균속도분포, 난류강도, 난류운동에너지 및 레이놀즈응력을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 후향단 입구에서 완전 발달된 유동이 유입됨을 알 수 있다.

Fig. 5.4는 본 실험에서 얻은 순시 3차원 속도 벡터를 보여주고 있다. 먼저 (a)와 (b)는 각각 카메라 1과 3, 카메라 2와 3에 의해 얻은 순시 3차원 속도 벡터를 (c)는 (a)와 (b)의 결과를 합한 순시 3차원 벡터를 보여주고 있다. 본 연구에서 에러 벡터를 제거하기 위해 목적함수에서 설명한 C, 식(3.7)을 이용하였으며, (d)는 C를 이용하여 에러를 제거한 속도 벡터를 보여주고 있다. GA에서 얻은 속도벡터(약 1800개)중 평균적으로 Frame당 약 700개의 벡터가 제거된 1100개의 순시 속도 벡터를 얻을 수 있었는데, 이는 실제 실험영상이 가상영상에 비해 깨끗하지 못함으로서 입자의 중심에 좋지 않은 영향을 미치기 때문이라고 생각되어지며, 이러한 문제를 해결하기 위해서 입자의 중심을 찾는 방법 및 유전알고리즘의 목적함수에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이와 같은 과정에의해 얻어진 데이터로부터 본 연구에서는 Agui와 Jimenez(1987)이 제안한 Gaussian Window보간 방법을 적용하여 얻어진 벡터로부터 3차원 시간 및 공간에 대한 보간을 행하였다. 보간은 X, Y, Z의 간격을 5mm로 하여 각각 15, 21, 15개의 Grid를 사용하였고, 시간에 대해서는 전후 2개의 파일을 사용하였고, 보간에 사용한 공간에 대한 윈도우 폭은 10mm, 시간에 대한 윈도우 폭은 1/60초를 사용하였다. Fig. 5.5는 이러한 방법에 의해 보간된 순시 속도분포를 Fig. 5.6은 실험에서 얻은 약 80만개의 벡터들로부터 보간된 평균 속도분포를 보여주고 있다.

Fig. 5.7은 평균 속도분포를 X가 -35mm, 0mm 35mm일 때의 Y-Z단면에 대한 속도분포로 유동의 중심부에서는 재부착은 Y = 40mm(5H)지점에서 발생하며, 양쪽 벽면의 영향으로 X=-35mm 및, 35mm 지점에서는 재부착 지점이 Y = 20 mm(4H)지점에서 발생함을 알 수 있었다. 또 유동의 중심부를 기준으로 대칭적인 흐름을 보여 주고 있다.

Fig. 5.8에서 Fig. 5.14까지는 이러한 보간 방법으로부터 계산된 난류 운동에너지, 난류강도 및 레이놀즈 응력등을 보여주고 있다. 각 그림의 (a)는 Z = 20mm지점에서의 X-Y단면을 (b)는 X= 0mm지점에서의 Y-Z단면을 (c)는 Y = 0mm지점에서의 X-Z단면을 나타낸다.

Fig. 5.8은 난류 운동에너지분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 중앙단면을 기준으로 서로 대칭적인 량을 유지하면서 하류방향으로 갈수록 난류 운동에너지가 증가하고, 넓은 영역으로 전파됨을 알 수 있다. Fig. 5.9, Fig. 5.10, Fig. 5.11은 난류강도 T_u, T_v, T_w를 보여주고 있다. 이들 물리량도 중앙단면을 기준으로 대칭적인 량을 유지하고 있고, 난류강도는 T_v가 지배적이라는 것을 알 수 있다. 또 T_w에 비해 상대적으로 T_u가 높게 나타나는데 이는 벽면에서 발생한 와가 중심부로 전파되면서 발생되는 것으로 보인다. T_v와 T_w는 난류 운동에너지와 거의 같은 분포를 보여주고 있고, T_u에 대해서는 다른 결과를 보여주고 있는데 이는 v, w는 주유동인 후향단에 지배되어지고, u는 벽면현상에 지배되는 것

임을 알 수 있다. 또 중앙단면에서 재부착지점인 40mm(5H)로 갈수록 이들 물리량이 경사를 이루면서 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5.12, Fig. 5.13, Fig. 5.14는 레이놀즈 응력, R_{uv}, R_{vw}, R_{uw}를 보여주고 있다. 이들 물리량도 중앙단면을 기준으로 대칭적인 형상을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 것은 유동이 거의 v에 지배를 받고 있기 때문에 상대적으로 적은 양을 지니는 w의 영향이 적었으며, R_{uv}와 R_{uw}의 거동이 매우 유사함을 알수 있었다. 또 중심부에서 강한 와가 존재하고, 후류 및 하부로 갈수록 와의 거동이 복잡해짐을 알 수 있으며, 이로부터 와들이 3차원적으로 운동량교환을 진행시키고 있음을 추론할 수 있다.

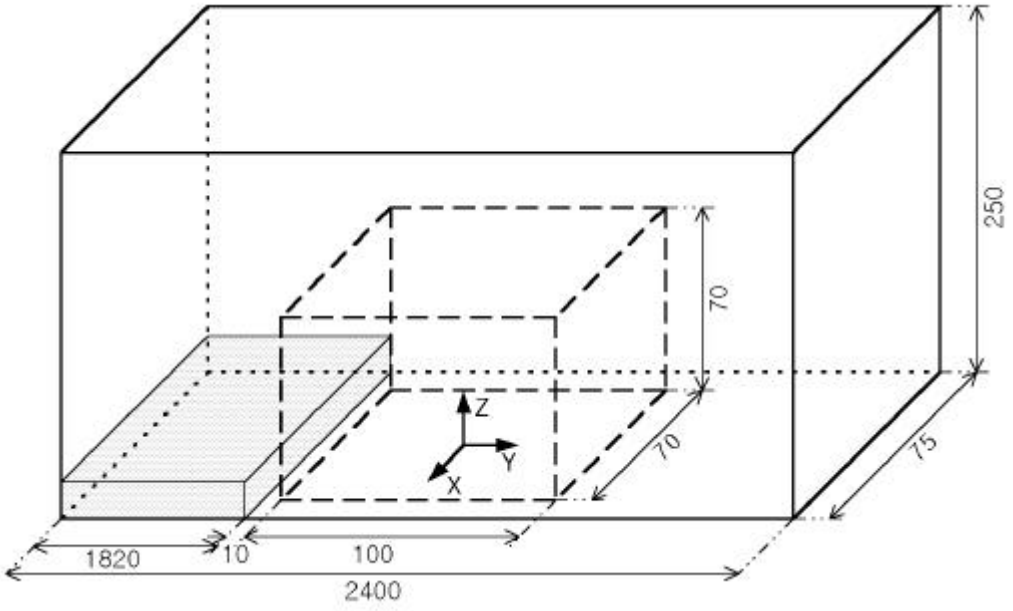
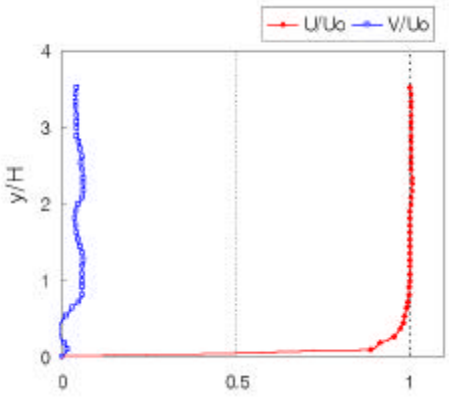
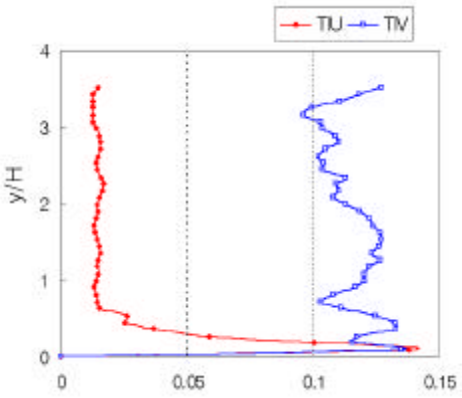


Fig. 5.2 Measurement area of backward facing step flow.

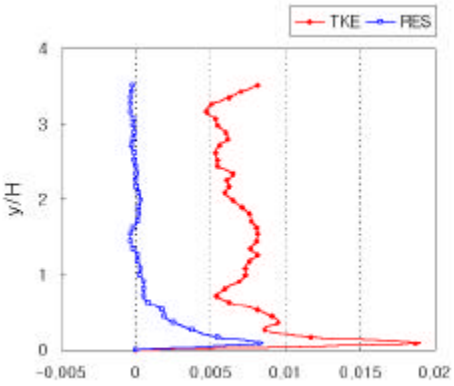


(a) Mean velocity profile



(b) Turbulent Intencity

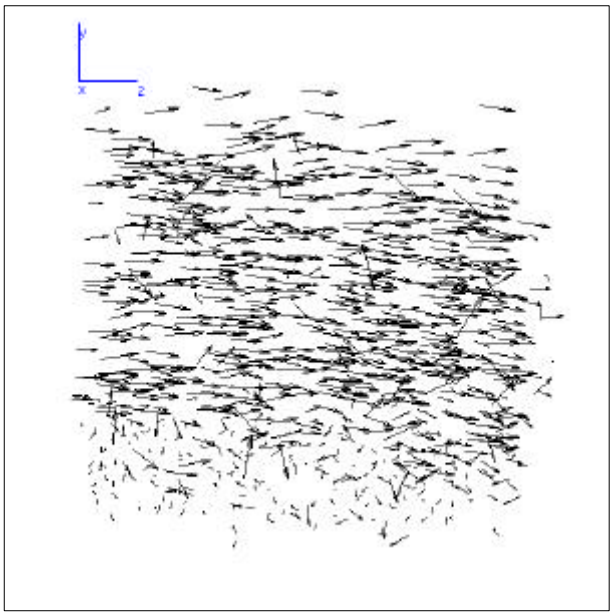
($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$, $T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)



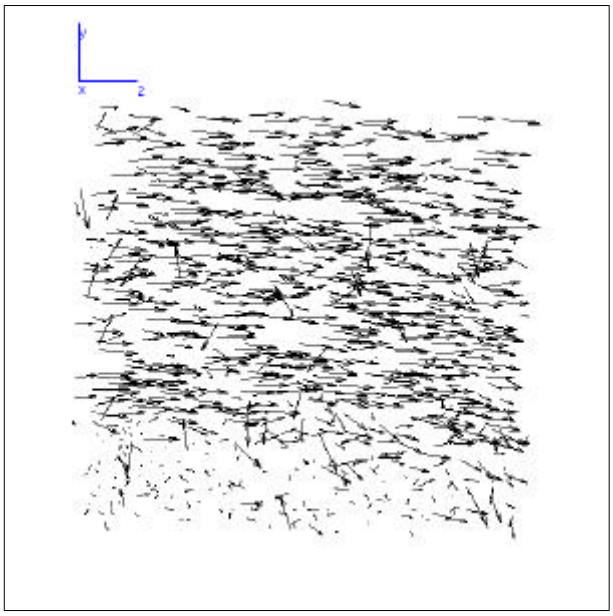
(c) Turbulence kinetic energy
and reynolds shear stress

($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$, $RES = - \overline{u'v'} / U_0^2$)

Fig 5.3 Inlet flow condition at y/H = -1.

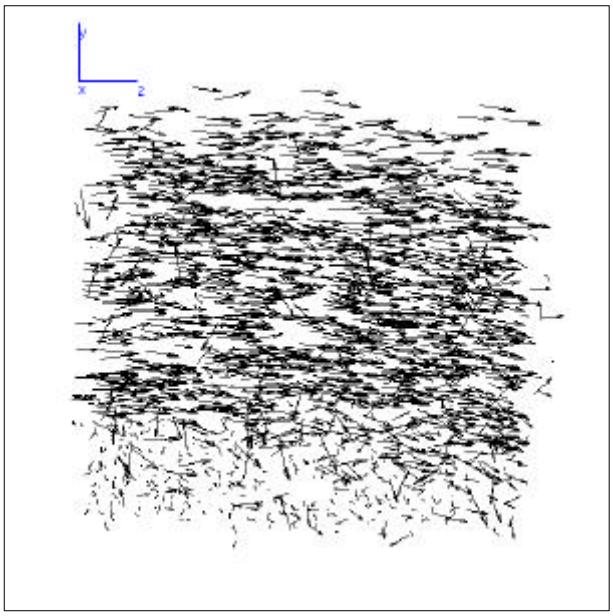


(a) Camera 1 and camera 3 (N = 908)

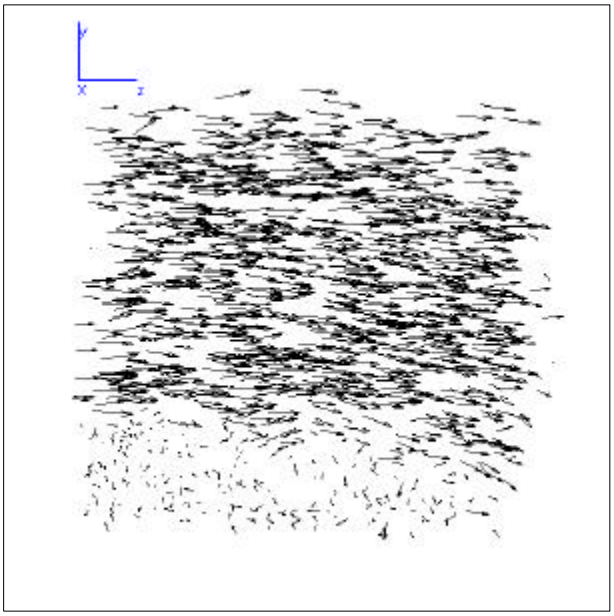


(b) Camera 2 and camera 3(N = 910)

Fig. 5.4 Instantaneous 3-D velocity vectors obtained by GA.



(c) Total velocity vectors of (a) and (b) (N= 1818)



(d) Velocity vectors removed error by gaussian window.

Fig. 5.4 (Continued)

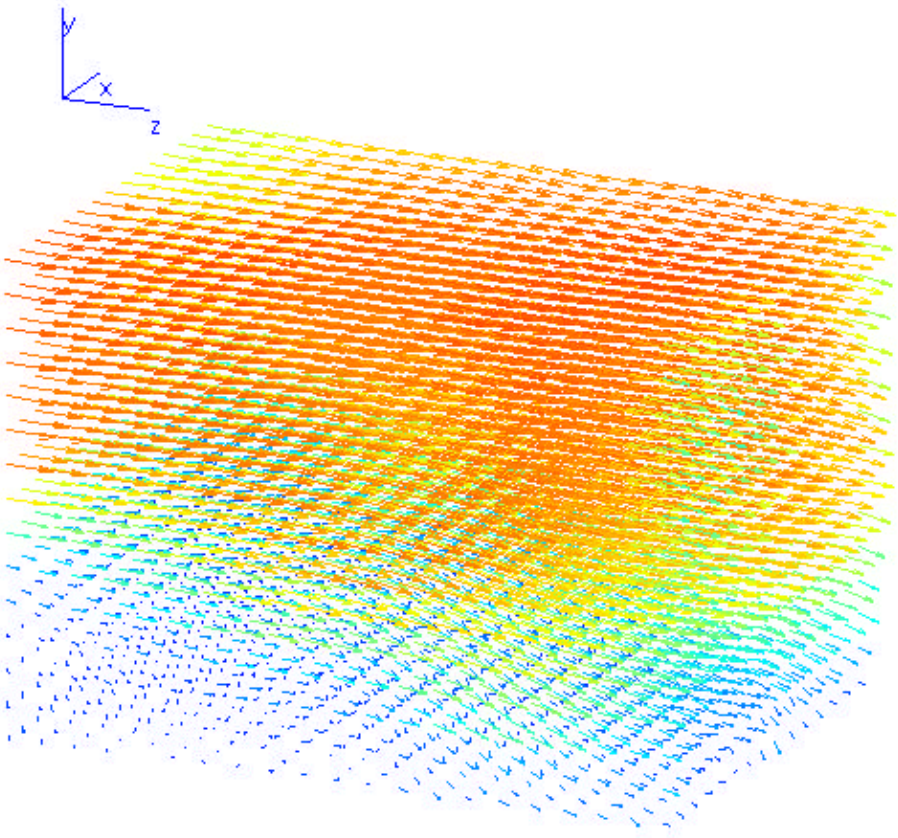


Fig. 5.5 Instantaneous 3-D velocity vectors interpolated by Gaussian window method.

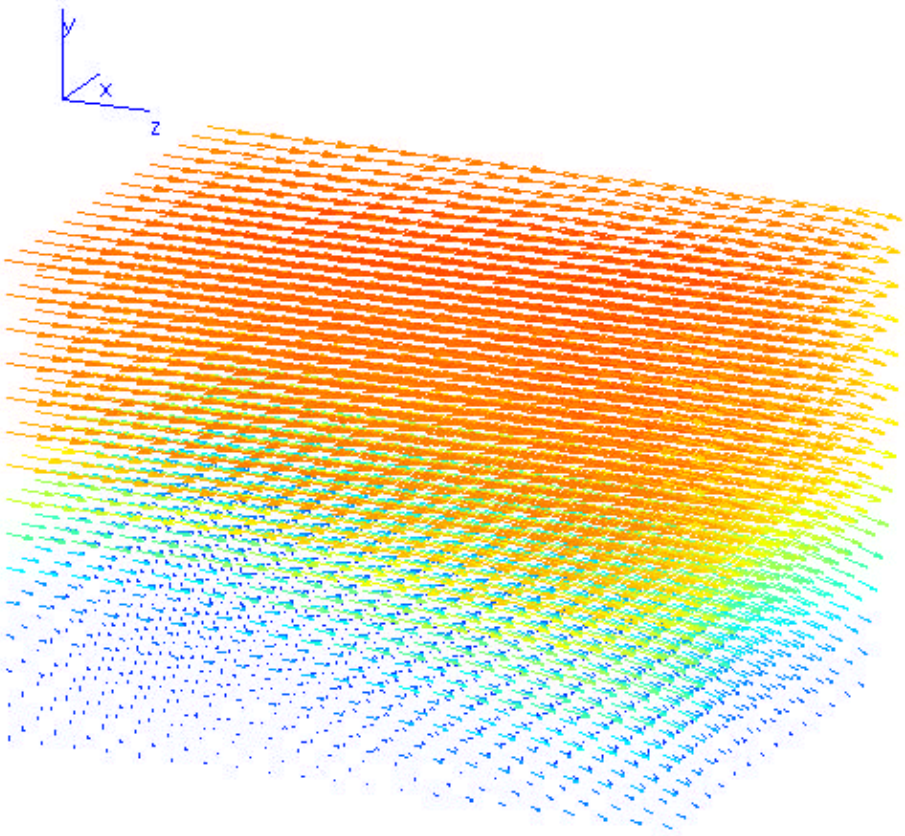
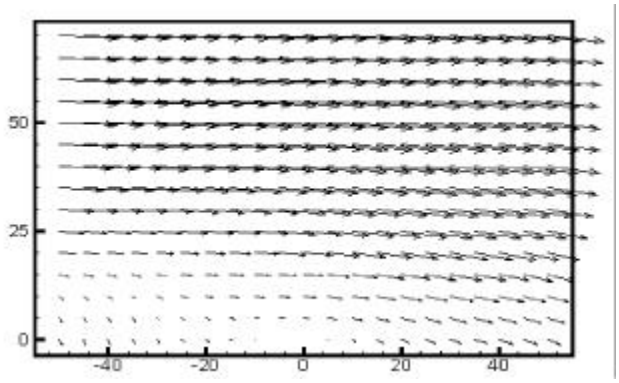
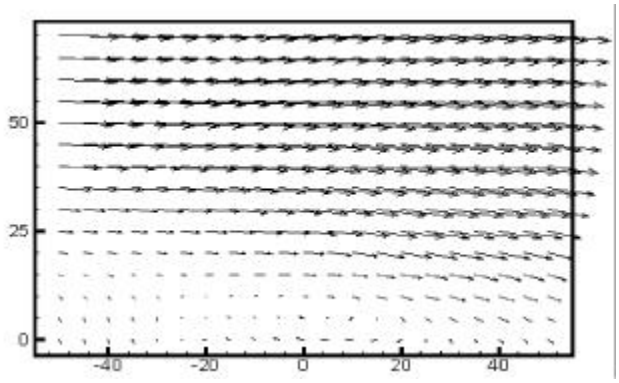


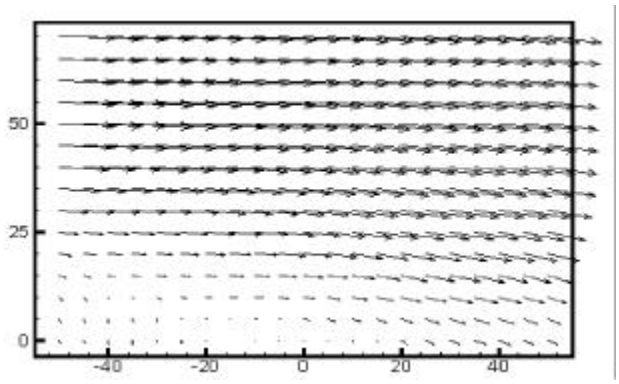
Fig 5.6 Mean 3-D velocity vectors interpolated by Gaussian Window method.



(a) X= -35mm

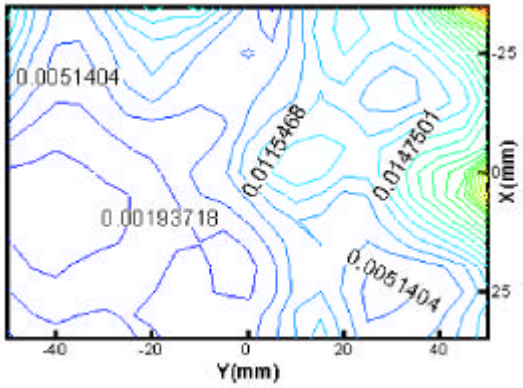


(b) X= 0mm

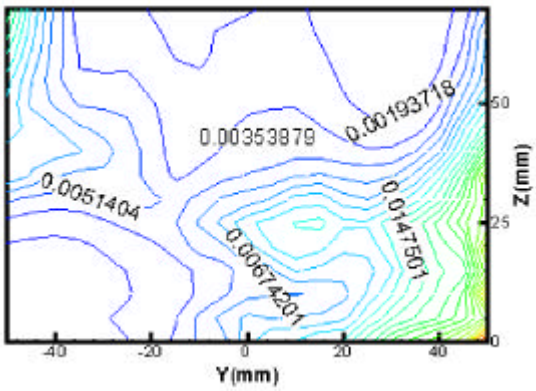


(c) X= 35mm

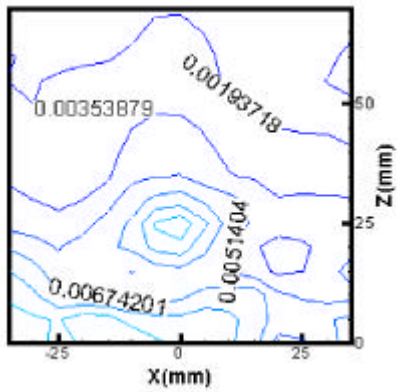
Fig. 5.7 Mean velocity profile of Y-Z plane.



(a) X-Y Plane at Z = 20mm

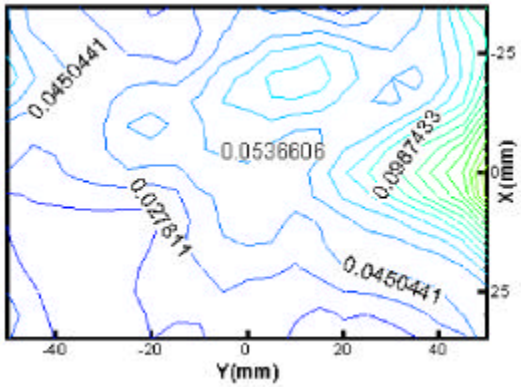


(b) Y-Z Plane at X= 0mm

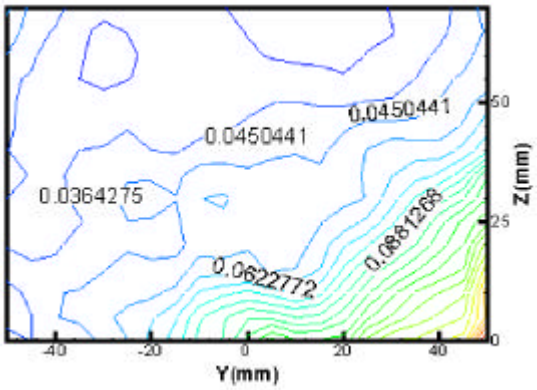


(c) X-Z plane at y = 0mm

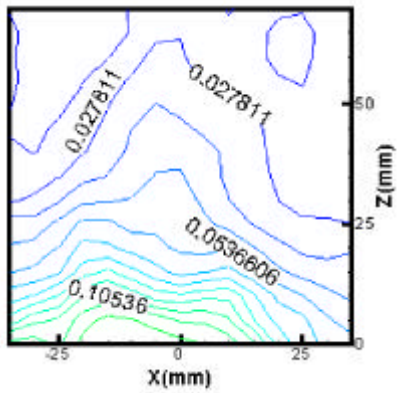
Fig. 5.8 Turbulent kinetic energy distribution. ($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^2$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm

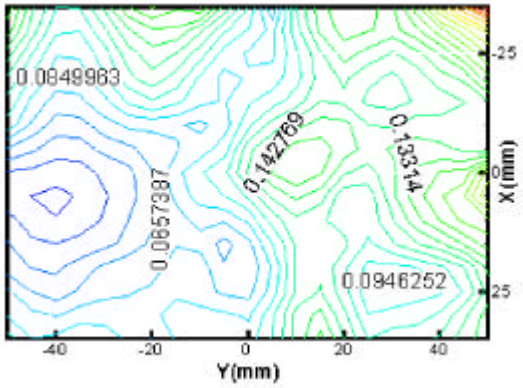


(b) Y-Z plane at X = 0mm

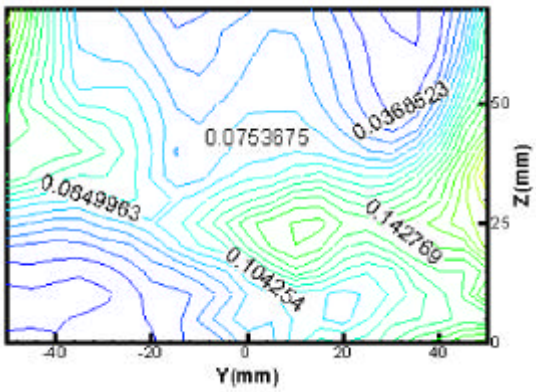


(c) X-Z plane at y = 0mm

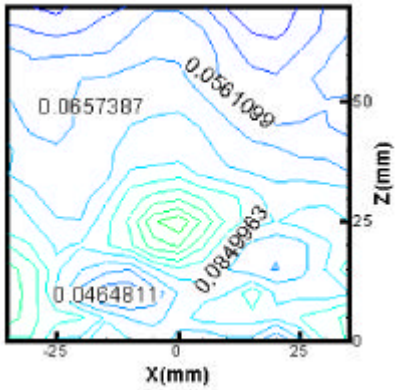
Fig. 5.9 Turbulence intensity distribution. ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm

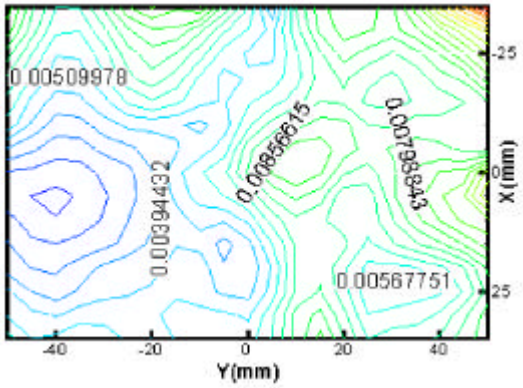


(b) Y-Z plane at X = 0mm

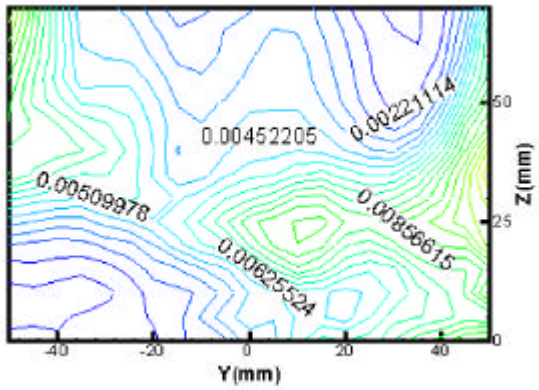


(c) X-Z plane at Y = 0mm

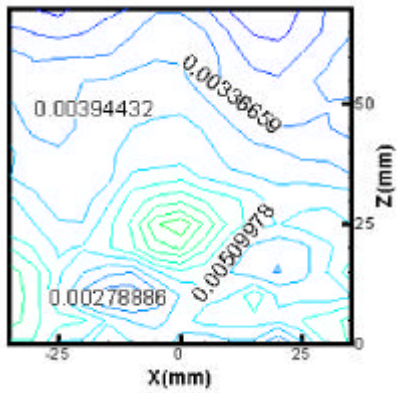
Fig. 5.10 Turbulence intensity distribution ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm

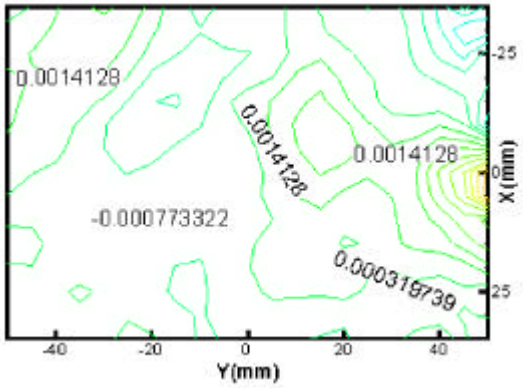


(b) Y-Z plane at X = 0mm

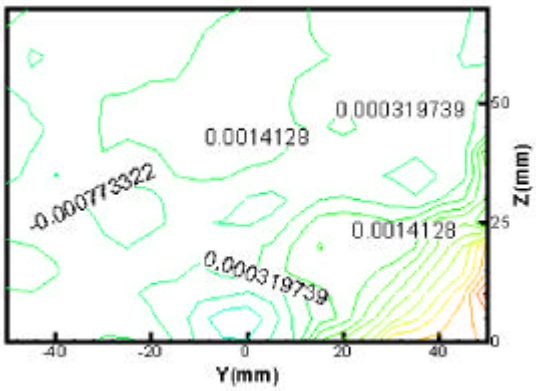


(c) X-Z plane at Y = 0mm

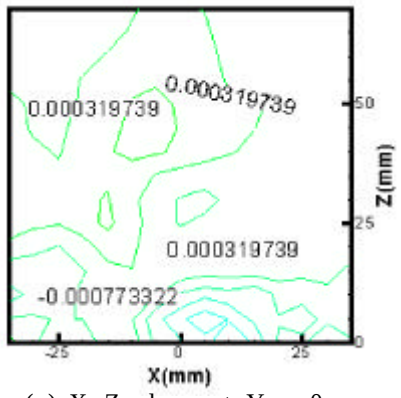
Fig. 5.11 Turbulence intensity distribution ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm

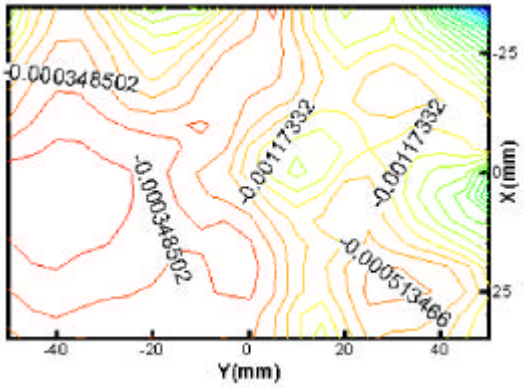


(b) Y-Z plane at X = 0mm

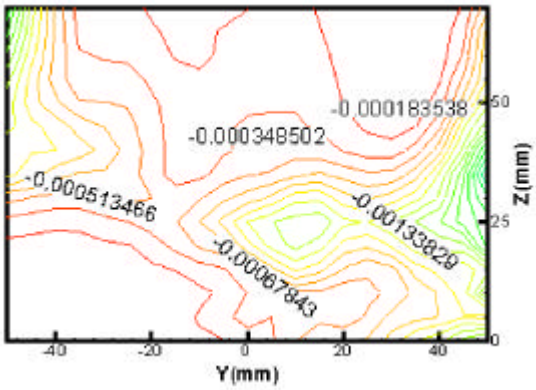


(c) X-Z plane at Y = 0mm

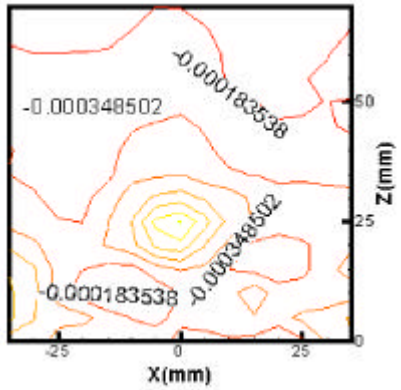
Fig. 5.12 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{u'v'} / U_0^2$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm

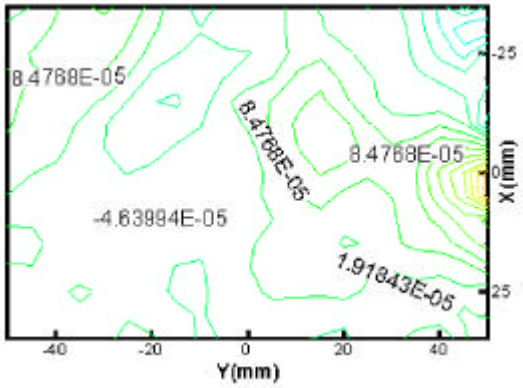


(b) Y-Z plane at X = 0mm

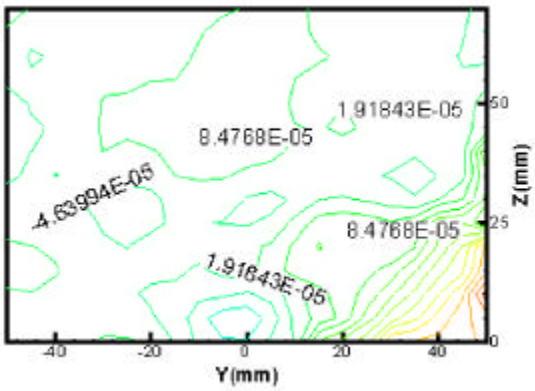


(c) X-Z plane at Y = 0mm

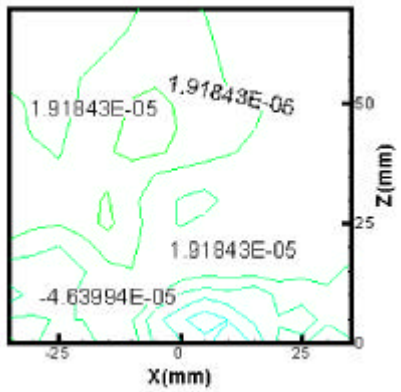
Fig. 5.13 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{v'w'} / U_0^2$)



(a) X-Y plane at Z = 20mm



(b) Y-Z plane at X = 0mm



(c) X-Z plane at Y = 0mm

Fig. 5.14 Reynolds shear stress distribution ($-\overline{w'u'} / U_0^2$)

6. 결 론

유전 알고리즘을 이용하여 시-공간을 동시에 탐색하는 3차원 PTV(Particle Imageing Velocimetry : 입자영상유속계) 방법을 개발하였고, 채널유동 및 충돌제트유동의 데이터를 가지고 가상영상기법을 적용하여 개발된 알고리즘의 성능평가를 수행하였다. 또 이러한 계측시스템을 후향단 실험에 적용하여 후향단의 물리적 특성에 대해 살펴보았다. 이러한 과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유전 알고리즘을 PTV에 적용과정에 있어서 소외되는 입자들을 배제하지 않기 위하여 참조집단(reference group)을 형성함과 동시에, 유체의 연속체 개념에 근거한 적합도를 적용함으로써 계측영역내의 입자 개수가 약 1,500개 일 경우 1,000개 이상의 3차원 순시속도벡터들을 얻어내었다. 이는 기존의 3차원 PTV계측법인 확률일치법(Doh et al, 1999)과 8시각 계측법(Kobayashi et al. 1989) 보다 회복률(65% 이상)이 약 3배 가량 높다.

본 연구에서 개발한 GA를 이용한 3D-PTV계측법에 대한 성능을 평가하기 위하여 채널유동의 LES데이터를 이용한 가상영상에 적용하였으며, 이로부터 Single-Frame 확률일치법(Choi et al. 1999)에 의거한 계측법보다 3배에 가까운 3차원 속도벡터 회복률을 보였다.

본 연구에서 개발된 GA를 이용한 3D-PTV계측법을 후향단유동장에 계측을 하여 순시속도분포, 평균속도분포, 난류통계량(난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈응력)을 재부착지점 부근에서 구하여 본 결과 정성적으로 타당한 결과를 얻어내었다.

본 계측법으로부터 얻어지는 순시속도벡터의 개수가 1,000개 이상이므로(1989, Nishino et. al. 1989) 복잡유동장 난류유동의 구조해명에 지대한 도움이 될 것으로 사료된다.

본 연구에서 가상영상에 의한 성능평가는 상당히 높은 결과를 얻을 수 있었으나, 후향단 계측에서 순시 약 1800개의 속도벡터중 700개 가량이 에러벡터로 판단되었다. 이는 실험시 얻은 영상은 가상영상에 비해 깨끗하지 못함으로서 입자의 중심에 좋지 않은 영향을 미치기 때문이라 생각된다. 이에 앞으로 입자의 중심을 찾는 방법 및 유전알고리즘의 목적함수등에 관한 개선을 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

Adamczyk, A. A. and Rimai, L., Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images. Exp. in Fluids. 6, (1988).

Agui, J. and Jimenez, J., On the performance analysis and application og grid interpolation techniques for fluid flows, exp. in Fluids Vol. 15 (1987).

Baek, S. J. and Lee, S. J., A new two-frame particle tracking algorithm using match probability. Exp. in Fluids. 22,(1988).

Chang, T. P. and Tatterson G. B., An automated analysis method for complex three dimensional mean flow fields. Proc. Third Int. Symp. Flow Visualization, (1983).

Chang, T. P., Wilcox, N. A and Tatterson, G. B., Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields. Opt. Eng. 23(3), (1984).

Doh, D. H., A Study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal. Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, (1995).

Doh, D. H., Jo H. J., Kobayashi, T. and Saga, T., A study on motion tracking of a floating vessel using 3-D PTV Proc. 2nd International Workshop on PIV `97-Fukui, Japan, (1997).

Doh, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Baek, T. S. and Lee, Y. W., Investigation technique for ventilation characteristics in a building by PIV.

Proc. of the Society of Air-conditioning and Refrigeration of Korea, Annual Winter Meeting, Institute for Korea Science and Technology, Vol.2, (1998).

Doh, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Baek, T. S., Kobayashi, T. and Saga, T., Quantitative real time measurement of an acoustic energy flow by PIV. Proc. of International Conf. on Optical Tech and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow, VSJ-SPIE98, Yokohama, Japan, The Visualization Society of Japan, The International Society for Optical Engineering, (1998)

Doh, D. H., Choi, S. H., Cho, G. R. and Lee, Y. W., Virtual reality images for a benchmark test of 3-Dimensional PIV algorithms for unsteady turbulent flows, **대한기계학회 유체공학부문** '99 **추계학술대회 논문집**, (1999).

Doh, D. H., Kim, D. H., Choi, S. W., Lee, Y. W., Saga, T. and Kobayashi, T., Development of noncontact velocity tracking algorithm for 3-D high speed flows using digital image processing technique(1-Frame 3-D PTV). Proc. The Third International Workshop on PIV '99-Santa Barbara, (1999).

Kasagi, N., Hirata, M., Nishino, K., Ninomiya, N. and Koizumi, N., Three-dimensional velocity measurement via digital image processing technique. J flow Visualization Soc. 7(26), (1987).

Kimura, I. and Nakami, Y., Determination of erroneous velocity vectors using genetic algorithms, **可視化情報**, Vol.13 Suppl. No.2 (1993)

Kimura, I., Hattori, A., and Ueda, M., Particle pairing using genetic algorithms for PIV, Proceedings of VSJ-SPIE98, Yokohama, JAPAN (1998).

Kobayashi, T., Saga, T. and Sekimoto, K., Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing.

ASME FED 85, (1989).

Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa, S., Multi-point velocity measurement for unsteady flow field by digital image processing. In: Flow Visualization V (Ed. Reznicek R). Washington D. C., (1990).

Kobayashi, T., Saga, T., Haeno, T. and Tsuda, N., Development of a real-time velocity measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design. In: Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia, B. et al.). ASME FED 128, (1991)

Nishino, K., Kasagi, N. and Hirata M., Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing. ASME J. Fluids Eng. 111(4), (1989)

Nishino, K., Yamawaki, T. and Masakazu, T. Application of 3-D PTV to microgravity fluid experiments. In: Workshop on PIV (Ed. Kobayashi, T. and Yamamoto, H.), Fukui: Visualization Society of Japan. (1995)

Ohyama, R. I., Takagi, T., Tsukiji, T., Nakanishi, S. and Kaneko, K., Particle tracking technique and velocity measurement of visualized flow fields by means of genetic algorithms, **可視化情報** Vol.13 Suppl. No.1 (1993).

Ohyama, R. I., Tsukiji, T. and Kaneko, K., Particle tracking of electrophoresis by using genetic algorithm, **可視化情報** Vol.13 Suppl. No.2 (1993).

Ohyama, R. I., Kunitou, Y. and Kaneko, K., Application of genetic algorithms of 3-Dimensional particle image tracking, **可視化情報** Vol.15 Suppl. N0.1 (1995).

Okamoto, K., Schmidl, W. D. and Hassan, Y. A., Spring model tracking algorithm for three-dimensional particle image velocimetry. FED-Vol. 209, ASME, (1995)

Okamoto, K. et al., Evaluation of the 3D-PIV Standard Images(PIV-STD Project). Proc. The Third International Workshop on PIV'99-Santa Barbara, (1999).

Racca, R. G. and Dewey, J. M., A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field. Exp. in Fluids, 6, (1988)

Sugii, Y., Okuno, T. and Nishio, S., Image measurement using governing equation of fluid flow, **可視化情報** Vol.16 Suppl. No.1 (1996).

Sugii, Y., Okuno, T. and Nishio, S., Image measurement using governing equation of fluid flow(2en report), **可視化情報** Vol.16 Suppl. No.2 (1996).

Willert, C. E. and Gharib, M., Digital particle image velocimetry; Exp. in Fluids, Vol. 10, No. 4, (1991).

Yamada, H. and Yamane, K., Particle image velocimetry using a genetic algorithm", **可視化情報** Vol.15 Suppl. No.1 (1995).

Yamakawa, M. and Iwashige, K., On-line velocity distribution measuring system applying image processing. J Flow Visualization Soc. Jpn., 6(20), (1986).

부 록

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
X_o(mm)	499.3601	-499.2706	0.0000
Y_o(mm)	-0.0000	0.0000	0.0000
Z_o(mm)	27.1021	27.0000	499.9997
ω(°)	-89.9999	90.0001	0.0000
Ψ(°)	-0.0004	0.0000	-0.0000
κ(°)	90.0001	-89.9999	0.0000
x_o(pixel)	-0.0031	0.0023	0.0010
y_o(pixel)	0.0051	0.0067	0.0001
c(pixel)	-2200.0009	-2200.0008	-2199.9992
k1	0.0000	-0.0000	-0.0000
k2	-0.0054	0.0015	0.0054

Table A1.1 Camera parameters of virtual image
(11 parameters, IH)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.75 - -7.75	0.20 - 0.20	6.52 - 6.52	0.00	0.00	0.00
2	-3.84 - -3.84	7.34 - 7.34	13.08 - 13.08	0.00	0.00	0.00
3	4.89 - 4.89	7.18 - 7.18	17.03 - 17.03	0.00	0.00	0.00
4	8.75 - 8.75	0.58 - 0.58	39.70 - 39.70	0.00	0.00	0.00
5	4.16 - 4.16	-6.54 - -6.54	15.91 - 15.91	0.00	0.00	0.00
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.52 - 24.52	0.00	0.00	0.00
7	-17.75 - -17.75	0.84 - 0.84	29.07 - 29.07	0.00	0.00	0.00
8	-15.48 - -15.48	10.21 - 10.21	26.46 - 26.46	0.00	0.00	0.00
9	-8.92 - -8.92	16.94 - 16.94	43.12 - 43.12	0.00	0.00	0.00
10	0.66 - 0.66	19.40 - 19.40	27.90 - 27.90	0.00	0.00	0.00
11	9.08 - 9.08	16.53 - 16.53	32.36 - 32.36	0.00	0.00	0.00
12	16.43 - 16.43	9.58 - 9.58	12.02 - 12.02	0.00	0.00	0.00
13	18.92 - 18.92	1.55 - 1.55	51.58 - 51.58	0.00	0.00	0.00
14	16.70 - 16.70	-8.47 - -8.47	22.98 - 22.98	0.00	0.00	0.00
15	9.64 - 9.64	9.64 - 9.64	40.23 - 40.23	0.00	0.00	0.00
16	0.41 - 0.41	-18.19 - -18.19	8.92 - 8.92	0.00	0.00	0.00
17	-8.54 - -8.54	-15.10 - -15.10	31.53 - 31.53	0.00	0.00	0.00
18	-15.61 - -15.61	-8.59 - -8.59	13.87 - 13.87	0.00	0.00	0.00
19	-32.77 - -32.77	0.61 - 0.61	43.42 - 43.42	0.00	0.00	0.00
20	-26.73 - -26.73	17.14 - 17.14	52.54 - 52.54	0.00	0.00	0.00
21	-15.89 - -15.89	28.20 - 28.20	37.90 - 37.90	0.00	0.00	0.00
22	0.60 - 0.60	33.32 - 33.32	4.98 - 4.98	0.00	0.00	0.00
23	16.92 - 16.92	28.93 - 28.93	46.47 - 46.47	0.00	0.00	0.00
24	28.67 - 28.67	16.85 - 16.85	17.47 - 17.47	0.00	0.00	0.00
25	33.22 - 33.22	1.05 - 1.05	34.18 - 34.18	0.00	0.00	0.00
26	28.88 - 28.88	-16.40 - -16.40	6.64 - 6.64	0.00	0.00	0.00
27	16.87 - 16.87	16.87 - 16.87	20.82 - 20.82	0.00	0.00	0.00
28	0.29 - 0.29	-32.60 - -32.60	50.45 - 50.45	0.00	0.00	0.00
29	-16.33 - -16.33	-28.12 - -28.12	10.19 - 10.19	0.00	0.00	0.00
30	-28.33 - -28.33	-15.13 - -15.13	33.23 - 33.23	0.00	0.00	0.00
31	-50.03 - -50.03	0.27 - 0.27	38.20 - 38.20	0.00	0.00	0.00
32	-42.79 - -42.79	26.42 - 26.42	30.16 - 30.16	0.00	0.00	0.00
33	-24.41 - -24.41	43.83 - 43.83	8.32 - 8.32	0.00	0.00	0.00
34	0.01 - 0.01	49.46 - 49.46	49.47 - 49.47	0.00	0.00	0.00
35	25.31 - 25.31	43.65 - 43.65	36.06 - 36.06	0.00	0.00	0.00
36	44.05 - 44.05	25.55 - 25.55	3.85 - 3.85	0.00	0.00	0.00
37	49.95 - 49.95	-0.32 - -0.32	24.92 - 24.92	0.00	0.00	0.00
38	43.83 - 43.83	-23.81 - -23.81	45.75 - 45.75	0.00	0.00	0.00
39	25.34 - 25.34	-42.71 - -42.71	42.03 - 42.03	0.00	0.00	0.00
40	0.02 - 0.02	-49.59 - -49.59	47.82 - 47.82	0.00	0.00	0.00
41	-24.92 - -24.92	-42.03 - -42.03	25.87 - 25.87	0.00	0.00	0.00
42	-43.03 - -43.03	-24.12 - -24.12	19.16 - 19.16	0.00	0.00	0.00

Average error : 0.00 0.00 0.00

Standard deviation : 0.00 0.00 0.00

Table A1.2 3-D error of calibration of virtual image
(11 parameters, IH)

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
X_o(mm)	491.6701	-493.6623	0.0105
Y_o(mm)	-0.0000	-1.0154	0.0073
Z_o(mm)	28.4032	26.9453	500.0433
ω(°)	-89.2312	90.4817	-0.0082
Ψ(°)	-0.0324	0.0061	0.0095
κ(°)	90.5742	-90.6415	-0.0001
x_o(pixel)	-18.8746	-19.9873	-0.4158
y_o(pixel)	19.4321	18.0556	-0.3523
c(pixel)	-2169.3432	-2173.5252	-2200.2813
k1	0.0000	0.3038	-0.0144
k2	-25.3482	-22.1474	0.9230

Table A2.1 Camera parameters of virtual image
(11 parameters, RH)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.75 - -7.75	0.18 - 0.20	6.52 - 6.52	0.00	0.02	0.00
2	-3.84 - -3.84	7.32 - 7.34	13.07 - 13.08	0.00	0.02	0.01
3	4.89 - 4.89	7.18 - 7.18	17.02 - 17.03	0.00	0.00	0.01
4	-50.03 - -50.03	0.21 - 0.27	38.18 - 38.20	0.00	0.06	0.02
7	-17.75 - -17.75	0.81 - 0.84	29.07 - 29.07	0.00	0.03	0.00
8	-15.48 - -15.48	10.19 - 10.21	26.46 - 26.46	0.00	0.02	0.00
9	-8.92 - -8.92	16.93 - 16.94	43.13 - 43.12	0.00	0.01	0.01
10	0.66 - 0.66	19.40 - 19.40	27.90 - 27.90	0.00	0.00	0.00
11	9.08 - 9.08	16.53 - 16.53	32.36 - 32.36	0.00	0.00	0.00
12	16.43 - 16.43	9.59 - 9.58	12.01 - 12.02	0.00	0.01	0.01
13	18.92 - 18.92	1.56 - 1.55	51.60 - 51.58	0.00	0.01	0.02
14	16.70 - 16.70	-8.47 - -8.47	22.98 - 22.98	0.00	0.00	0.00
15	9.64 - 9.64	-15.48 - -15.47	40.23 - 40.23	0.00	0.01	0.00
16	0.41 - 0.41	-18.19 - -18.19	8.93 - 8.92	0.00	0.00	0.01
17	-8.54 - -8.54	-15.12 - -15.10	31.52 - 31.53	0.00	0.02	0.01
18	-15.61 - -15.61	-8.62 - -8.59	13.87 - 13.87	0.00	0.03	0.00
20	-26.73 - -26.73	17.10 - 17.14	52.55 - 52.54	0.00	0.04	0.01
21	-15.89 - -15.89	28.17 - 28.20	37.90 - 37.90	0.00	0.03	0.00
22	0.60 - 0.60	33.31 - 33.32	4.98 - 4.98	0.00	0.01	0.00
24	28.67 - 28.67	16.88 - 16.85	17.46 - 17.47	0.00	0.03	0.01
25	33.22 - 33.22	1.07 - 1.05	34.19 - 34.18	0.00	0.02	0.01
26	28.88 - 28.88	-16.38 - -16.40	6.64 - 6.64	0.00	0.02	0.00
27	16.87 - 16.87	-28.13 - -28.14	20.82 - 20.82	0.00	0.01	0.00
28	0.29 - 0.29	-32.61 - -32.60	50.43 - 50.45	0.00	0.01	0.02
29	-16.32 - -16.33	-28.12 - -28.12	10.21 - 10.19	0.01	0.00	0.02
30	-28.33 - -28.33	-15.17 - -15.13	33.21 - 33.23	0.00	0.04	0.02
33	-24.41 - -24.41	43.80 - 43.83	8.33 - 8.32	0.00	0.03	0.01
34	0.01 - 0.01	49.48 - 49.46	49.49 - 49.47	0.00	0.02	0.02
35	25.30 - 25.31	43.69 - 43.65	36.08 - 36.06	0.01	0.04	0.02
36	44.05 - 44.05	25.60 - 25.55	3.83 - 3.85	0.00	0.05	0.02
37	49.94 - 49.95	-0.28 - -0.32	24.91 - 24.92	0.01	0.04	0.01
38	43.83 - 43.83	-23.79 - -23.81	45.76 - 45.75	0.00	0.02	0.01
39	25.34 - 25.34	-42.69 - -42.71	42.02 - 42.03	0.00	0.02	0.01
40	0.02 - 0.02	-49.60 - -49.59	47.81 - 47.82	0.00	0.01	0.01
41	-24.92 - -24.92	-42.03 - -42.03	25.87 - 25.87	0.00	0.00	0.00
42	-43.03 - -43.03	-24.15 - -24.12	19.17 - 19.16	0.00	0.03	0.01

Average error : 0.00 0.02 0.01

Standard deviation : 0.00 0.03 0.01

Table A2.2 3-D error of calibration of virtual image
(11 parameters, RH)

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
dis(mm)	500.00036	499.9998	499.9997
cx(pixel)	2200.00170	2199.9995	2199.9997
cy(pixel)	2200.00122	2199.9995	2200.0000
ω(°)	-90.0000	90.0000	-0.0000
Ψ(°)	-0.0000	0.0000	0.0000
κ(°)	-90.0000	90.0000	-180.0000
mx(pixel)	0.00000	0.0000	0.0000
my(pixel)	27.00000	26.9999	-0.0000
k1	-0.0000	0.0000	0.0000
k2	0.00000	-0.0000	-0.0000

Table 3.1 Camera parameters of virtual image
(10 parameters, IH)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.75 - -7.75	0.20 - 0.20	6.52 - 6.52	0.00	0.00	0.00
2	-3.84 - -3.84	7.34 - 7.34	13.08 - 13.08	0.00	0.00	0.00
3	4.89 - 4.89	7.18 - 7.18	17.03 - 17.03	0.00	0.00	0.00
4	8.75 - 8.75	0.58 - 0.58	39.70 - 39.70	0.00	0.00	0.00
5	4.16 - 4.16	-6.54 - -6.54	15.91 - 15.91	0.00	0.00	0.00
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.52 - 24.52	0.00	0.00	0.00
7	-17.75 - -17.75	0.84 - 0.84	29.07 - 29.07	0.00	0.00	0.00
8	-15.48 - -15.48	10.21 - 10.21	26.46 - 26.46	0.00	0.00	0.00
9	-8.92 - -8.92	16.94 - 16.94	43.12 - 43.12	0.00	0.00	0.00
10	0.66 - 0.66	19.40 - 19.40	27.90 - 27.90	0.00	0.00	0.00
11	9.08 - 9.08	16.53 - 16.53	32.36 - 32.36	0.00	0.00	0.00
12	16.43 - 16.43	9.58 - 9.58	12.02 - 12.02	0.00	0.00	0.00
13	18.92 - 18.92	1.55 - 1.55	51.58 - 51.58	0.00	0.00	0.00
14	16.70 - 16.70	-8.47 - -8.47	22.98 - 22.98	0.00	0.00	0.00
15	9.64 - 9.64	-15.47 - -15.47	40.23 - 40.23	0.00	0.00	0.00
16	0.41 - 0.41	-18.19 - -18.19	8.92 - 8.92	0.00	0.00	0.00
17	-8.54 - -8.54	-15.10 - -15.10	31.53 - 31.53	0.00	0.00	0.00
18	-15.61 - -15.61	-8.59 - -8.59	13.87 - 13.87	0.00	0.00	0.00
19	-32.77 - -32.77	0.61 - 0.61	43.42 - 43.42	0.00	0.00	0.00
20	-26.73 - -26.73	17.14 - 17.14	52.54 - 52.54	0.00	0.00	0.00
21	-15.89 - -15.89	28.20 - 28.20	37.90 - 37.90	0.00	0.00	0.00
22	0.60 - 0.60	33.32 - 33.32	4.98 - 4.98	0.00	0.00	0.00
23	16.92 - 16.92	28.93 - 28.93	46.47 - 46.47	0.00	0.00	0.00
24	28.67 - 28.67	16.85 - 16.85	17.47 - 17.47	0.00	0.00	0.00
25	33.22 - 33.22	1.05 - 1.05	34.18 - 34.18	0.00	0.00	0.00
26	28.88 - 28.88	-16.40 - -16.40	6.64 - 6.64	0.00	0.00	0.00
27	16.87 - 16.87	-28.14 - -28.14	20.82 - 20.82	0.00	0.00	0.00
28	0.29 - 0.29	-32.60 - -32.60	50.45 - 50.45	0.00	0.00	0.00
29	-16.33 - -16.33	-28.12 - -28.12	10.19 - 10.19	0.00	0.00	0.00
30	-28.33 - -28.33	-15.13 - -15.13	33.23 - 33.23	0.00	0.00	0.00
31	-50.03 - -50.03	0.27 - 0.27	38.20 - 38.20	0.00	0.00	0.00
32	-42.79 - -42.79	26.42 - 26.42	30.16 - 30.16	0.00	0.00	0.00
33	-24.41 - -24.41	43.83 - 43.83	8.32 - 8.32	0.00	0.00	0.00
34	0.01 - 0.01	49.46 - 49.46	49.47 - 49.47	0.00	0.00	0.00
35	25.31 - 25.31	43.65 - 43.65	36.06 - 36.06	0.00	0.00	0.00
36	44.05 - 44.05	25.55 - 25.55	3.85 - 3.85	0.00	0.00	0.00
37	49.94 - 49.95	-0.32 - -0.32	24.92 - 24.92	0.00	0.00	0.00
38	43.83 - 43.83	-23.81 - -23.81	45.75 - 45.75	0.00	0.00	0.00
39	25.34 - 25.34	-42.71 - -42.71	42.03 - 42.03	0.00	0.00	0.00
40	0.02 - 0.02	-49.59 - -49.59	47.82 - 47.82	0.00	0.00	0.00
41	-24.92 - -24.92	-42.03 - -42.03	25.87 - 25.87	0.00	0.00	0.00
42	-43.03 - -43.03	-24.12 - -24.12	19.16 - 19.16	0.00	0.00	0.00

Average error : 0.00 0.02 0.01

Standard deviation : 0.00 0.03 0.01

Table A3.2 3-D error of calibration of virtual image
(10 parameters, IH)

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
dis(mm)	499.9994	499.9335	500.1036
cx(pixel)	2199.9973	2199.5288	2200.7526
cy(pixel)	2200.0166	2199.6311	2200.6987
ω(°)	-90.0000	89.9950	-0.0000
Ψ(°)	-0.0000	-0.0000	-0.0000
κ(°)	-89.9987	89.9999	-180.0000
mx(pixel)	-0.0007	0.00002	0.0003
my(pixel)	26.9997	27.00034	0.0000
k1	0.0000	-0.0000	0.0000
k2	-0.0000	0.00000	-0.0000

Table A4.1 Camera parameters of virtual image
(10 parameters, RH)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx dy dz
1	-7.75 - -7.75	0.20 - 0.20	6.52 - 6.52	0.00 0.00 0.00
2	-3.84 - -3.84	7.34 - 7.34	13.08 - 13.08	0.00 0.00 0.00
3	4.89 - 4.89	7.18 - 7.18	17.03 - 17.03	0.00 0.00 0.00
4	8.75 - 8.75	0.58 - 0.58	39.70 - 39.70	0.00 0.00 0.00
5	4.16 - 4.16	-6.54 - -6.54	15.91 - 15.91	0.00 0.00 0.00
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.52 - 24.52	0.00 0.00 0.00
7	-17.75 - -17.75	0.84 - 0.84	29.07 - 29.07	0.00 0.00 0.00
8	-15.48 - -15.48	10.21 - 10.21	26.46 - 26.46	0.00 0.00 0.00
9	-8.92 - -8.92	16.94 - 16.94	43.12 - 43.12	0.00 0.00 0.00
10	0.66 - 0.66	19.40 - 19.40	27.90 - 27.90	0.00 0.00 0.00
11	9.08 - 9.08	16.53 - 16.53	32.36 - 32.36	0.00 0.00 0.00
12	16.43 - 16.43	9.58 - 9.58	12.02 - 12.02	0.00 0.00 0.00
13	18.92 - 18.92	1.55 - 1.55	51.58 - 51.58	0.00 0.00 0.00
14	16.70 - 16.70	-8.47 - -8.47	22.98 - 22.98	0.00 0.00 0.00
15	9.64 - 9.64	-15.47 - -15.47	40.23 - 40.23	0.00 0.00 0.00
16	0.41 - 0.41	-18.19 - -18.19	8.92 - 8.92	0.00 0.00 0.00
17	-8.54 - -8.54	-15.10 - -15.10	31.53 - 31.53	0.00 0.00 0.00
18	-15.61 - -15.61	-8.59 - -8.59	13.87 - 13.87	0.00 0.00 0.00
19	-32.77 - -32.77	0.61 - 0.61	43.42 - 43.42	0.00 0.00 0.00
20	-26.73 - -26.73	17.14 - 17.14	52.54 - 52.54	0.00 0.00 0.00
21	-15.89 - -15.89	28.20 - 28.20	37.90 - 37.90	0.00 0.00 0.00
22	0.60 - 0.60	33.32 - 33.32	4.98 - 4.98	0.00 0.00 0.00
23	16.92 - 16.92	28.93 - 28.93	46.47 - 46.47	0.00 0.00 0.00
24	28.67 - 28.67	16.85 - 16.85	17.47 - 17.47	0.00 0.00 0.00
25	33.22 - 33.22	1.05 - 1.05	34.18 - 34.18	0.00 0.00 0.00
26	28.88 - 28.88	-16.40 - -16.40	6.64 - 6.64	0.00 0.00 0.00
27	16.87 - 16.87	-28.14 - -28.14	20.82 - 20.82	0.00 0.00 0.00
28	0.29 - 0.29	-32.60 - -32.60	50.45 - 50.45	0.00 0.00 0.00
29	-16.33 - -16.33	-28.12 - -28.12	10.19 - 10.19	0.00 0.00 0.00
30	-28.33 - -28.33	-15.13 - -15.13	33.23 - 33.23	0.00 0.00 0.00
31	-50.03 - -50.03	0.27 - 0.27	38.20 - 38.20	0.00 0.00 0.00
32	-42.79 - -42.79	26.42 - 26.42	30.16 - 30.16	0.00 0.00 0.00
33	-24.41 - -24.41	43.83 - 43.83	8.32 - 8.32	0.00 0.00 0.00
34	0.01 - 0.01	49.46 - 49.46	49.47 - 49.47	0.00 0.00 0.00
35	25.31 - 25.31	43.65 - 43.65	36.06 - 36.06	0.00 0.00 0.00
36	44.05 - 44.05	25.55 - 25.55	3.85 - 3.85	0.00 0.00 0.00
37	49.94 - 49.95	-0.32 - -0.32	24.92 - 24.92	0.00 0.00 0.00
38	43.83 - 43.83	-23.81 - -23.81	45.75 - 45.75	0.00 0.00 0.00
39	25.34 - 25.34	-42.71 - -42.71	42.03 - 42.03	0.00 0.00 0.00
40	0.02 - 0.02	-49.59 - -49.59	47.82 - 47.82	0.00 0.00 0.00
41	-24.92 - -24.92	-42.03 - -42.03	25.87 - 25.87	0.00 0.00 0.00
42	-43.03 - -43.03	-24.12 - -24.12	19.16 - 19.16	0.00 0.00 0.00

Average error : 0.00 0.00 0.00

Standard deviation : 0.00 0.00 0.00

Table A4.2 3-D error of calibration of virtual image
(10 parameter, RH)

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
X_o(mm)	298.2380	-294.3097	21.2176
Y_o(mm)	590.6079	-636.8735	1.7067
Z_o(mm)	19.6709	28.7552	715.6505
ω(°)	83.8680	-98.9806	9.4330
Ψ(°)	-0.5757	0.1543	-1.3937
κ(°)	27.6702	24.3260	-784.2893
x_o(pixel)	33.8601	-26.9847	-30.1113
y_o(pixel)	-399.2690	451.0914	-594.7935
c(pixel)	-2922.2584	3310.1608	2989.1971
k1	0.5140	0.2397	0.2849
k2	-12.0099	-5.6973	-4.2018

Table A5.1 Camera parameters of real image(11 parameter)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-3.84 - -3.84	7.31 - 7.34	13.01 - 13.08	0.00	0.03	0.07
2	8.75 - 8.75	0.61 - 0.58	39.67 - 39.70	0.00	0.03	0.03
3	4.14 - 4.16	-6.57 - -6.54	15.98 - 15.91	0.02	0.03	0.07
4	-3.28 - -3.26	-6.28 - -6.31	24.49 - 24.52	0.02	0.03	0.03
5	-8.88 - -8.92	16.93 - 16.94	43.27 - 43.12	0.04	0.01	0.15
6	0.64 - 0.66	19.36 - 19.40	27.93 - 27.90	0.02	0.04	0.03
7	9.05 - 9.08	16.52 - 16.53	32.39 - 32.36	0.03	0.01	0.03
8	16.44 - 16.43	9.58 - 9.58	12.00 - 12.02	0.01	0.00	0.02
9	18.88 - 18.92	1.70 - 1.55	51.61 - 51.58	0.04	0.15	0.03
10	16.66 - 16.70	-8.59 - -8.47	17.37 - 22.98	0.04	0.12	5.61
11	9.62 - 9.64	-15.46 - -15.47	40.30 - 40.23	0.02	0.01	0.07
12	0.42 - 0.41	-18.22 - -18.19	8.86 - 8.92	0.01	0.03	0.06
13	-8.50 - -8.54	-15.07 - -15.10	31.49 - 31.53	0.04	0.03	0.04
14	-15.62 - -15.61	-8.56 - -8.59	13.90 - 13.87	0.01	0.03	0.04
15	-32.64 - -32.77	0.72 - 0.61	43.39 - 43.42	0.13	0.11	0.03
16	-26.60 - -26.73	17.14 - 17.14	52.50 - 52.54	0.13	0.00	0.04
17	-15.87 - -15.89	28.11 - 28.20	37.86 - 37.90	0.02	0.09	0.04
18	0.55 - 0.60	33.20 - 33.32	4.88 - 4.98	0.05	0.12	0.10
19	16.88 - 16.92	28.96 - 28.93	46.52 - 46.47	0.04	0.03	0.05
20	28.59 - 28.67	16.79 - 16.85	22.80 - 17.47	0.08	0.06	5.33
21	33.23 - 33.22	1.14 - 1.05	34.17 - 34.18	0.01	0.09	0.01
22	28.96 - 28.88	-16.49 - -16.40	6.51 - 6.64	0.08	0.09	0.13
23	16.85 - 16.87	-28.31 - -28.14	20.88 - 20.82	0.02	0.17	0.06
24	0.23 - 0.29	-32.62 - -32.60	50.48 - 50.45	0.06	0.02	0.03
25	-16.33 - -16.33	-28.08 - -28.12	10.19 - 10.19	0.00	0.04	0.00
26	-28.25 - -28.33	-14.96 - -15.13	33.23 - 33.23	0.08	0.17	0.00
27	-49.95 - -50.03	0.42 - 0.27	38.18 - 38.20	0.08	0.15	0.02
28	-42.87 - -42.79	26.29 - 26.42	30.30 - 30.16	0.08	0.13	0.14
29	-24.64 - -24.41	43.65 - 43.83	8.38 - 8.32	0.23	0.18	0.06
30	-0.06 - 0.01	49.24 - 49.46	49.37 - 49.47	0.07	0.22	0.10
31	25.22 - 25.31	43.60 - 43.65	36.06 - 36.06	0.09	0.05	0.00
32	44.16 - 44.05	25.72 - 25.55	3.83 - 3.85	0.11	0.17	0.02
33	50.06 - 49.95	-0.14 - -0.32	24.90 - 24.92	0.12	0.18	0.02
34	43.89 - 43.83	-23.84 - -23.81	45.88 - 45.75	0.06	0.03	0.13
35	25.28 - 25.34	-42.93 - -42.71	42.11 - 42.03	0.06	0.22	0.08
36	-0.06 - 0.02	-49.72 - -49.59	47.75 - 47.82	0.08	0.13	0.07
37	-24.93 - -24.92	-41.97 - -42.03	25.79 - 25.87	0.01	0.06	0.08
38	-42.99 - -43.03	-23.83 - -24.12	19.18 - 19.16	0.04	0.29	0.02
		Average error :		0.05	0.09	0.34
		Standard deviation :		0.07	0.12	1.27

Table A5.2 3-D error of calibration of real image
(11 parameter, Camera 1 and 3)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.74 - -7.75	0.19 - 0.20	6.49 - 6.52	0.01	0.01	0.03
2	-3.82 - -3.84	7.33 - 7.34	13.00 - 13.08	0.02	0.01	0.08
3	4.88 - 4.89	7.18 - 7.18	17.05 - 17.03	0.01	0.00	0.02
4	8.77 - 8.75	0.61 - 0.58	39.68 - 39.70	0.02	0.03	0.02
5	4.14 - 4.16	-6.55 - -6.54	15.98 - 15.91	0.02	0.01	0.07
6	-3.26 - -3.26	-6.28 - -6.31	24.49 - 24.52	0.00	0.03	0.03
7	-17.70 - -17.75	0.86 - 0.84	29.04 - 29.07	0.05	0.02	0.03
8	-8.92 - -8.92	16.94 - 16.94	43.25 - 43.12	0.00	0.00	0.13
9	0.65 - 0.66	19.37 - 19.40	27.88 - 27.90	0.01	0.03	0.02
10	9.07 - 9.08	16.52 - 16.53	32.34 - 32.36	0.01	0.01	0.02
11	16.43 - 16.43	9.62 - 9.58	12.02 - 12.02	0.00	0.04	0.00
12	18.96 - 18.92	1.65 - 1.55	51.66 - 51.58	0.04	0.10	0.08
13	16.67 - 16.70	-8.48 - -8.47	22.95 - 22.98	0.03	0.01	0.03
14	9.63 - 9.64	-15.47 - -15.47	40.29 - 40.23	0.01	0.00	0.06
15	0.38 - 0.41	-18.20 - -18.19	8.87 - 8.92	0.03	0.01	0.05
16	-8.51 - -8.54	-15.07 - -15.10	31.48 - 31.53	0.03	0.03	0.05
17	-15.60 - -15.61	-8.57 - -8.59	13.91 - 13.87	0.01	0.02	0.04
18	-32.68 - -32.77	0.74 - 0.61	43.39 - 43.42	0.09	0.13	0.03
19	-26.69 - -26.73	17.16 - 17.14	52.53 - 52.54	0.04	0.02	0.01
20	-15.90 - -15.89	28.12 - 28.20	37.83 - 37.90	0.01	0.08	0.07
21	0.61 - 0.60	33.23 - 33.32	4.91 - 4.98	0.01	0.09	0.07
22	16.91 - 16.92	28.95 - 28.93	46.57 - 46.47	0.01	0.02	0.10
23	28.59 - 28.67	16.98 - 16.85	17.46 - 17.47	0.08	0.13	0.01
24	33.28 - 33.22	1.13 - 1.05	34.19 - 34.18	0.06	0.08	0.01
25	28.87 - 28.88	-16.42 - -16.40	6.61 - 6.64	0.01	0.02	0.03
26	16.78 - 16.87	-28.28 - -28.14	20.88 - 20.82	0.09	0.14	0.06
27	0.26 - 0.29	-32.64 - -32.60	50.48 - 50.45	0.03	0.04	0.03
28	-16.34 - -16.33	-28.09 - -28.12	10.27 - 10.19	0.01	0.03	0.08
29	-28.25 - -28.33	-14.96 - -15.13	33.23 - 33.23	0.08	0.17	0.00
30	-49.98 - -50.03	0.44 - 0.27	38.18 - 38.20	0.05	0.17	0.02
31	-42.86 - -42.79	26.30 - 26.42	30.22 - 30.16	0.07	0.12	0.06
32	-24.50 - -24.41	43.62 - 43.83	8.34 - 8.32	0.09	0.21	0.02
33	-0.13 - 0.01	49.26 - 49.46	49.41 - 49.47	0.14	0.20	0.06
34	25.25 - 25.31	43.61 - 43.65	36.05 - 36.06	0.06	0.04	0.01
35	50.12 - 49.95	-0.12 - -0.32	24.87 - 24.92	0.17	0.20	0.05
36	43.98 - 43.83	-23.87 - -23.81	45.83 - 45.75	0.15	0.06	0.08
37	25.28 - 25.34	-42.95 - -42.71	42.06 - 42.03	0.06	0.24	0.03
38	-0.07 - 0.02	-49.73 - -49.59	47.71 - 47.82	0.09	0.14	0.11
39	-24.95 - -24.92	-41.98 - -42.03	25.84 - 25.87	0.03	0.05	0.03
40	-42.92 - -43.03	-23.88 - -24.12	19.19 - 19.16	0.11	0.24	0.03

Average error : 0.05 0.07 0.04

Standard deviation : 0.06 0.11 0.05

Table A5.3 3-D error of calibration of real image
(11 parameter, Camera2 and 3)

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
dis(mm)	691.7072	717.5567	731.4384
cx(mm)	3113.3847	3434.6047	3118.2497
cy(mm)	3146.4086	3468.9360	3158.2297
ω(°)	-93.4833	92.8993	-1.9217
Ψ(°)	62.9341	-65.2117	-0.0985
κ(°)	-87.4470	92.5015	-64.3059
mx(pixel)	2.7532	-7.7429	0.4125
my(pixel)	38.0886	43.9326	3.7371
k1	0.0000	0.0000	-0.0000
k2	-0.0000	0.0000	0.0000

Table A6.1 Camera parameters of real image(10 parameter)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-3.81 - -3.84	7.36 - 7.34	13.22 - 13.08	0.03	0.02	0.13
2	8.74 - 8.75	0.58 - 0.58	39.66 - 39.70	0.01	0.00	0.05
3	4.11 - 4.16	-6.53 - -6.54	16.16 - 15.91	0.05	0.01	0.25
4	-3.29 - -3.26	-6.29 - -6.31	24.56 - 24.52	0.03	0.02	0.04
5	-8.87 - -8.92	16.96 - 16.94	43.22 - 43.12	0.05	0.02	0.10
6	0.68 - 0.66	19.43 - 19.40	27.96 - 27.90	0.01	0.03	0.06
7	9.06 - 9.08	16.54 - 16.53	32.39 - 32.36	0.02	0.02	0.03
8	16.38 - 16.43	9.61 - 9.58	12.22 - 12.02	0.05	0.03	0.20
9	18.85 - 18.92	1.61 - 1.55	51.53 - 51.58	0.07	0.06	0.05
10	16.61 - 16.70	-8.47 - -8.47	23.06 - 22.98	0.09	0.00	0.08
11	9.59 - 9.64	-15.47 - -15.47	40.28 - 40.23	0.05	0.00	0.05
12	0.38 - 0.41	-18.14 - -18.19	9.19 - 8.92	0.04	0.05	0.27
13	-8.52 - -8.54	-15.11 - -15.10	31.51 - 31.53	0.02	0.01	0.02
14	-15.61 - -15.61	-8.59 - -8.59	14.12 - 13.87	0.00	0.00	0.25
15	-32.64 - -32.77	0.57 - 0.61	43.32 - 43.42	0.13	0.03	0.10
16	-26.58 - -26.73	17.10 - 17.14	52.36 - 52.54	0.15	0.04	0.18
17	-15.78 - -15.89	28.19 - 28.20	37.83 - 37.90	0.11	0.01	0.06
18	0.68 - 0.60	33.34 - 33.32	5.18 - 4.98	0.08	0.01	0.20
19	16.89 - 16.92	28.96 - 28.93	46.49 - 46.47	0.03	0.03	0.02
20	28.53 - 28.67	16.85 - 16.85	17.62 - 17.47	0.14	0.00	0.15
21	33.08 - 33.22	1.04 - 1.05	34.22 - 34.18	0.15	0.00	0.03
22	28.73 - 28.88	-16.35 - -16.40	6.91 - 6.64	0.15	0.05	0.27
23	16.74 - 16.87	-28.13 - -28.14	21.07 - 20.82	0.13	0.01	0.25
24	0.22 - 0.29	-32.60 - -32.60	50.37 - 50.45	0.07	0.01	0.08
25	-16.33 - -16.33	-28.07 - -28.12	10.50 - 10.19	0.00	0.05	0.31
26	-28.26 - -28.33	-15.11 - -15.13	33.24 - 33.23	0.07	0.02	0.02
27	-49.86 - -50.03	0.13 - 0.27	38.16 - 38.20	0.18	0.15	0.05
28	-42.63 - -42.79	26.20 - 26.42	30.34 - 30.16	0.16	0.22	0.18
29	-24.28 - -24.41	43.76 - 43.83	8.66 - 8.32	0.13	0.07	0.34
30	0.09 - 0.01	49.45 - 49.46	49.29 - 49.47	0.07	0.01	0.17
31	25.26 - 25.31	43.64 - 43.65	36.05 - 36.06	0.05	0.01	0.01
32	43.87 - 44.05	25.60 - 25.55	4.16 - 3.85	0.17	0.05	0.32
33	49.73 - 49.95	-0.30 - -0.32	25.04 - 24.92	0.22	0.02	0.12
34	43.66 - 43.83	-23.79 - -23.81	45.77 - 45.75	0.17	0.02	0.02
35	25.18 - 25.34	-42.65 - -42.71	42.07 - 42.03	0.15	0.07	0.04
36	-0.06 - 0.02	-49.57 - -49.59	47.66 - 47.82	0.08	0.02	0.17
37	-24.94 - -24.92	-42.04 - -42.03	25.88 - 25.87	0.02	0.02	0.00
38	-42.92 - -43.03	-24.11 - -24.12	19.37 - 19.16	0.11	0.01	0.20

Average error : 0.09 0.03 0.13

Standard deviation : 0.20 0.05 0.16

Table A6.2 3-D error of calibration of real image.
(10 parameter, Camera 1 and 3)

NO	CalcX - KjnX	CalcY - KjnY	CalcZ - KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.74 - -7.75	0.21 - 0.20	6.63 - 6.52	0.01	0.01	0.11
2	-3.81 - -3.84	7.36 - 7.34	13.11 - 13.08	0.03	0.02	0.03
3	4.89 - 4.89	7.19 - 7.18	17.14 - 17.03	0.00	0.01	0.11
4	8.76 - 8.75	0.57 - 0.58	39.68 - 39.70	0.00	0.01	0.02
5	4.16 - 4.16	-6.56 - -6.54	16.07 - 15.91	0.00	0.02	0.16
6	-3.26 - -3.26	-6.31 - -6.31	24.54 - 24.52	0.01	0.00	0.02
7	-17.72 - -17.75	0.83 - 0.84	29.10 - 29.07	0.02	0.01	0.03
8	-8.91 - -8.92	16.99 - 16.94	43.25 - 43.12	0.02	0.04	0.13
9	0.67 - 0.66	19.43 - 19.40	27.94 - 27.90	0.01	0.03	0.04
10	9.07 - 9.08	16.54 - 16.53	32.37 - 32.36	0.01	0.01	0.01
11	16.43 - 16.43	9.59 - 9.58	12.14 - 12.02	0.00	0.01	0.12
12	18.88 - 18.92	1.60 - 1.55	51.59 - 51.58	0.03	0.05	0.01
13	16.66 - 16.70	-8.50 - -8.47	23.02 - 22.98	0.04	0.03	0.04
14	9.63 - 9.64	-15.48 - -15.47	40.29 - 40.23	0.02	0.01	0.06
15	0.42 - 0.41	-18.17 - -18.19	8.99 - 8.92	0.01	0.02	0.07
16	-8.51 - -8.54	-15.11 - -15.10	31.51 - 31.53	0.03	0.02	0.02
17	-15.62 - -15.61	-8.59 - -8.59	14.01 - 13.87	0.01	0.00	0.15
18	-32.69 - -32.77	0.61 - 0.61	43.40 - 43.42	0.08	0.00	0.02
19	-26.63 - -26.73	17.14 - 17.14	52.47 - 52.54	0.10	0.00	0.07
20	-15.83 - -15.89	28.22 - 28.20	37.86 - 37.90	0.06	0.03	0.04
21	0.66 - 0.60	33.35 - 33.32	5.09 - 4.98	0.06	0.03	0.11
22	16.89 - 16.92	28.96 - 28.93	46.54 - 46.47	0.03	0.03	0.06
23	28.52 - 28.67	16.86 - 16.85	17.58 - 17.47	0.15	0.01	0.10
24	33.14 - 33.22	1.02 - 1.05	34.22 - 34.18	0.08	0.03	0.04
25	28.86 - 28.88	-16.41 - -16.40	6.77 - 6.64	0.02	0.01	0.14
26	16.83 - 16.87	-28.17 - -28.14	20.97 - 20.82	0.05	0.03	0.15
27	0.26 - 0.29	-32.61 - -32.60	50.45 - 50.45	0.03	0.01	0.00
28	-16.31 - -16.33	-28.09 - -28.12	10.37 - 10.19	0.02	0.03	0.18
29	-28.29 - -28.33	-15.09 - -15.13	33.28 - 33.23	0.03	0.04	0.05
30	-49.94 - -50.03	0.20 - 0.27	38.23 - 38.20	0.09	0.07	0.02
31	-42.73 - -42.79	26.29 - 26.42	30.31 - 30.16	0.06	0.13	0.15
32	-24.36 - -24.41	43.83 - 43.83	8.52 - 8.32	0.05	0.00	0.20
33	0.04 - 0.01	49.48 - 49.46	49.37 - 49.47	0.03	0.02	0.10
34	25.25 - 25.31	43.64 - 43.65	36.06 - 36.06	0.06	0.01	0.00
35	49.84 - 49.95	-0.34 - -0.32	24.98 - 24.92	0.11	0.02	0.06
36	43.75 - 43.83	-23.82 - -23.81	45.80 - 45.75	0.09	0.00	0.05
37	25.28 - 25.34	-42.68 - -42.71	42.07 - 42.03	0.06	0.03	0.04
38	-0.02 - 0.02	-49.58 - -49.59	47.70 - 47.82	0.04	0.01	0.12
39	-24.93 - -24.92	-42.05 - -42.03	25.88 - 25.87	0.01	0.02	0.01
40	-42.97 - -43.03	-24.08 - -24.12	19.29 - 19.16	0.06	0.04	0.12
			Average error :	0.04	0.02	0.07
			Standard deviation :	0.05	0.03	0.09

Table A6.3 3-D error of calibration of real image
(10 parameter, Camera 2 and 3)

No.	X	Y	Z
1	27.2359	25.8712	50.8389
2	17.0659	30.8656	12.2741
3	7.3853	28.1224	20.4705
4	- 4.0899	31.6828	27.9866
5	- 9.8180	24.1802	34.5475
6	- 21.1356	29.9407	57.3446
7	- 19.1988	20.9384	17.8583
8	- 23.3158	13.9380	25.5348
9	0.0455	17.3297	35.0617
10	4.9856	10.0397	25.1099
11	12.7309	12.0777	11.1630
12	17.5439	17.2804	54.6606
13	23.2251	8.0389	12.9859
14	25.2377	4.0284	32.0377
15	23.9438	- 4.9078	24.5114
16	16.5195	- 11.2036	14.9579
17	10.7404	- 1.9926	15.0674
18	3.0244	- 3.6137	7.1928
19	- 0.9431	2.7587	57.3938
20	- 17.4006	7.4468	52.9113
21	- 17.1236	0.0179	45.3506
22	- 27.0326	3.6517	40.3120
23	- 20.4484	- 7.0391	55.7908
24	- 25.7401	- 13.7081	23.1994
25	- 26.3041	- 34.3459	55.5443
26	- 13.5432	- 31.6327	6.5229
27	- 14.6283	- 22.0101	11.3685
28	- 9.9468	- 17.8094	34.2984
29	- 6.4483	- 10.2072	46.7946
30	6.3441	- 9.2417	36.3864
31	6.8545	- 16.4655	58.3965
32	13.6273	- 18.8086	44.9948
33	20.8506	- 24.0402	57.3853
34	25.1569	- 27.2610	15.0176
35	19.9751	- 30.4456	40.5589
36	9.8929	- 32.3615	32.0924
37	0.2662	- 26.3782	22.8299
38	- 9.0213	- 30.8461	38.3497

Table A7 Absolute coordinate of calibrator used experiment of backward facing step flow

Fig. A1 Image viewed by camera 1 of calibrator.

Fig. A2 Image viewed by camera 2 of calibrator.

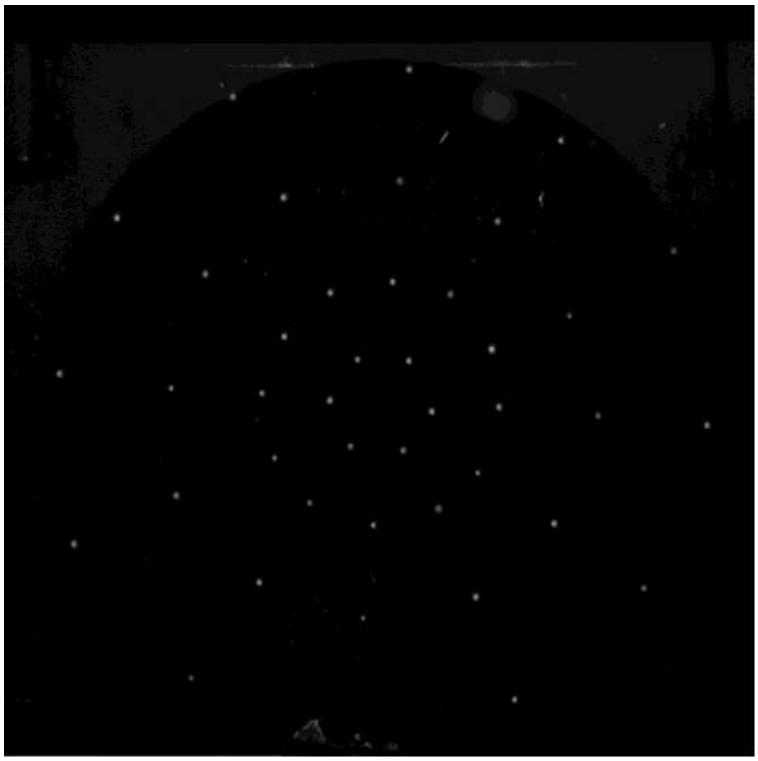


Fig. A3 Image viewed by camera 3 of calibrator

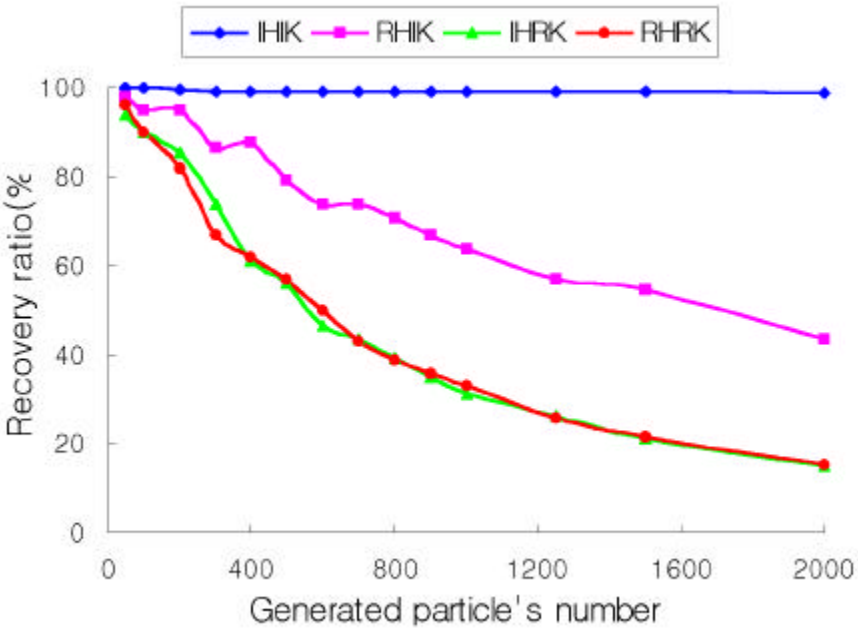


Fig. A4 Recovery ratio resulted by Doh et al(1999)

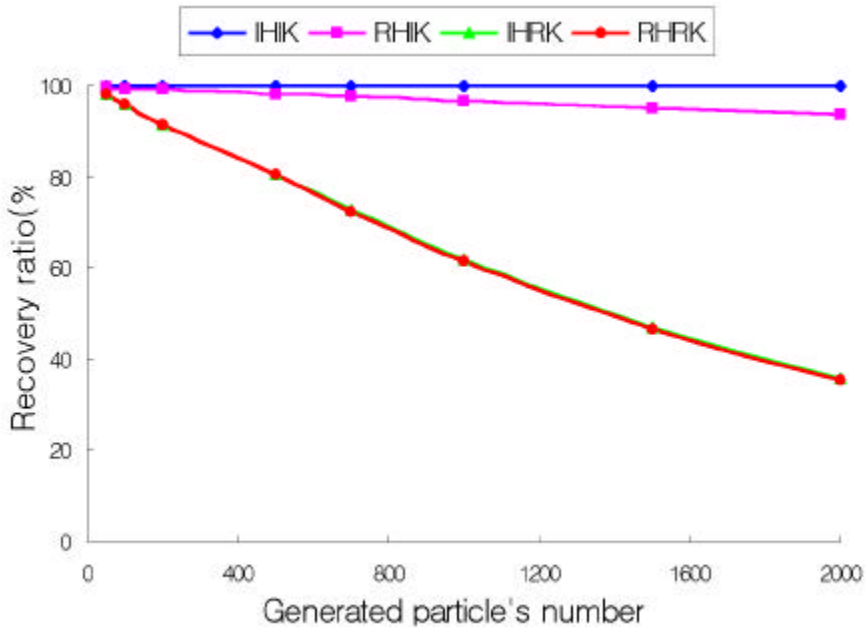


Fig. A5 Recovery ratio of 1-Frame 3-D PTV used 10 parameter.

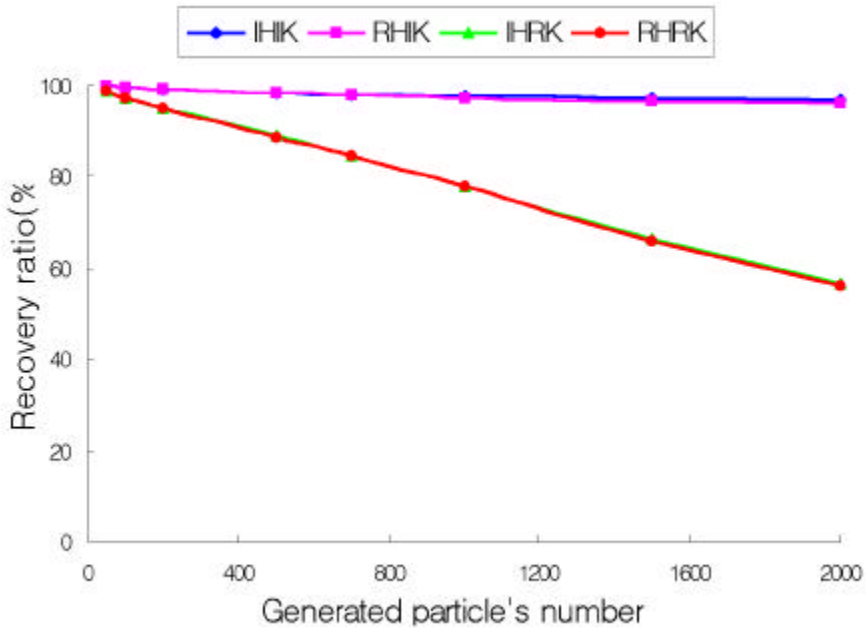


Fig. A6 Recovery ratio of GA.

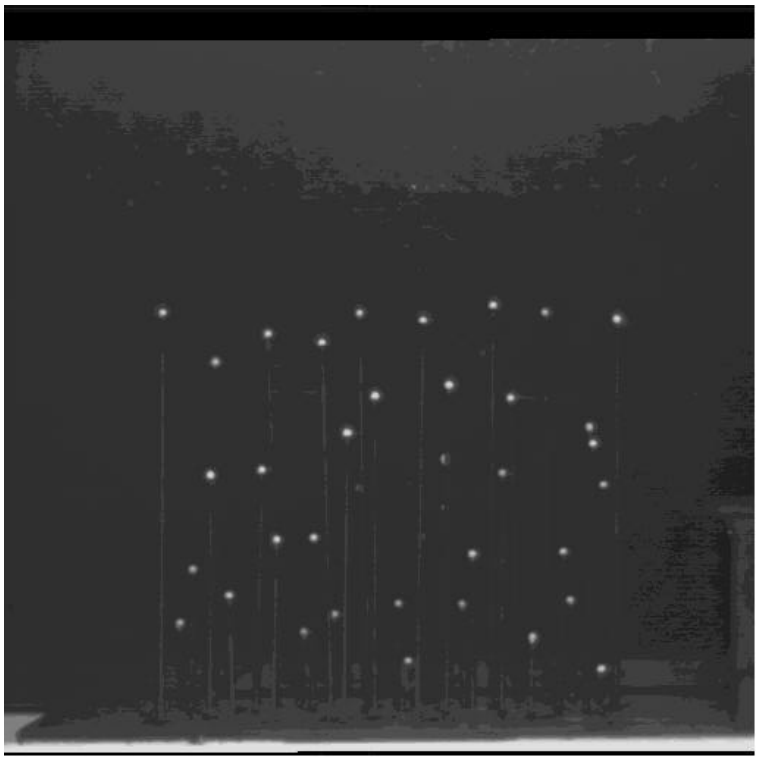


Fig. A7 Picture of calibrator used experiment of backward facing step flow

유전 알고리즘을 이용한 3차원 PTV 기법의 개발에 관한 연구

석사과정 냉동공조공학과 조 경 래
지도교수 도 덕 희

충분한 정확도와 신뢰도를 가진 다양한 난류계측에서 열선유속계와 LDV가 계측에 널리적용되어 왔다. 그러나 이러한 계측법은 기본적으로 측정대상공간에 대하여 한 점에 대한 정보밖에 얻을 수 없다. 이러한 이유로 동시 다점계측이라는 장점을 가진 PIV계측기법에 의해 얻어내는 연구성과들이 계속 증가 추세에 있으며, 특히 난류에 대한 많은 정보를 얻기 위해서는 3방향의 속도성분을 동시에 계측하는 것이 요구되어지고, 이러한 3차원 계측이 활발히 진행되어지고 있다. 그러나, 기존의 계측방법으로 속도가 빠르거나, 3차원성이 강한 복잡한 유동장에 대한 계측은 어려운 단계에 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 기존의 탐색방법인 시간-공간, 공간-시간방식이 아닌 시ㆍ공간을 동시에 탐색하여, 계측과정을 축소하여 계측시에 존재하는 오차의 영향을 최소화하는 알고리즘을 구축하고자 한다. 이러한 알고리즘의 구축을 위해 자연세계의 진화 현상인 적자생존에 기초한 최적화 알고리즘인 유전알고리즘을 적용하였다. 유전알고리즘을 적용하기위해 3차원 벡터를 기준으로 하는 개체를 정의하였고, 3차원 위치와 유체의 연속의식으로부터 적합도를 선정하여 유전연산자를 적용하는 알고리즘을 개발하였다.

개발된 알고리즘은 채널유동 및 충돌제트유동에 대한 가상영상기법에 의해 알고리즘의 성능평가를 수행하였으며, 기존의 방법보다 우수한 결과를 보임을 알 수 있었다. 나아가 후향단유동장에 계측을 통하여 순간 3차원 속도벡터의 개수가 약 1,100개 이상으로 획득하는데 성공하였으며, 정성적으로 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 개발된 유전알고리즘에 의한 PTV기법이 가상영상 및 채널유동대한 우수한 결과를 얻음으로서 난류유동의 계측법의 유효성을 입증하였다.