

A study on Three-Dimensional Velocity Measurement Technique Using Image Processing

Seong-Hwan Choi ¹⁾, Young-Ho Lee ²⁾

Abstract

A system that is able to measure the three components of velocity of a moving object is constructed using two CCD cameras, a digital image processor, and a personal computer. In order to measure the three-dimensional positions of moving objects, the relation between the absolute and the camera coordinate systems should be estimated. Since the relation is expressed in a system of non-linear equations, the equation coefficients are obtained by the use of successive approximation method. After calculating the camera parameters, three-dimensional position of objects are able to be calculated by the obtained parameters. As a system test, an experiment on a rotating plate is done. The three-dimensional positions of pins fitted on the rotating plate are calculated and the three dimensional velocity vectors are obtained through the constructed system. Through an uncertainty analysis, the validity of this technique is verified.

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정

2) 한국해양대학교 기계냉동자동차공학부 교수

제 1 장 서 론

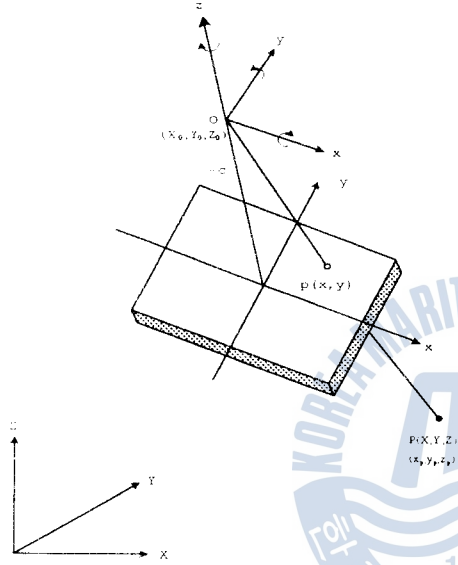
1. 연구의 목적

유동장전체의 속도분포를 계측하는 것은 공학적으로는 유체기계나 열기기의 특성을 파악할 수 있게 한다는 점에서 매우 중요한 의미를 가지며 이러한 계측법의 확립이란 공학분야에 있어서 선제되고 있는 실정이다. 지금까지 유동장의 계측에는 피토크나 열선유속계 혹은 레이저도플러유속계 등을 이용해 왔으나 이 계측법은 기본적으로 측정대상공간에 대해서 한 점에 대한 정보밖에 얻을수 없다. 따라서, 다수의 점에 대한 정보를 얻기 위하여는 이들의 갯수를 증가시켜 유동장 전체에 걸쳐서 배치시켜야 하는데 이로 인한 유동장자체에 대한 교란의 영향이 커지게 되어 유동장전체를 동시에 측정하는 것은 어렵다. 또한 레이저도플러유속계를 사용하면 유동장을 교란시키지 않고 속도를 계측할 수 있지만 유동장의 속도변동에 비해서 충분히 짧은 시간으로 측정의 전영역을 계측하기란 어려우므로 동시다점계측에는 적합치 않다. 한편, 유동장의 가시화에 의하여 얻어 내는 속도계측방법은 유동장을 거의 교란하지 않으면서 유동장전체를 동시에 측정할 수가 있다. 게다가 시간적으로 연속해서 계측하면 유동장전체의 시간변화를 알 수가 있으며 유동장의 조직적구조도 조사할 수가 있게 된다. 또한, 이 방법에 의해 얻어낸 결과를 수치계산에 의하여 얻어낸 결과와 비교하기 쉬운 이점도 있다. 그런데, 공학적으로 실용적가치가 있는 유동장의 대부분이 3차원적이라는 점과 기존의 가시화계측방법의 대부분이 2차원적이라는 점을 감안할 때 보다 실용성이 있는 정보를 얻기 위해서는 유동장을 3차원적으로 계측해야 할 필요가 있다. 그래서 본 연구에서는 2대의 상용카메라와 디지털화상처리를 이용하여 유동장의 속도를 3차원적으로 계측할 수 있는 시스템을 구축하는 것을 목적으로 한다.

제 2 장 측정원리

2.1 단사진표정(單寫眞標定)

스테레오사진법이란 2대의 카메라사진으로부터 측정대상물의 3차



원위치를 계측하는 방법으로 공간에 고정된 좌표계에 대한 카메라의 위치와 기울기 및 초점거리 등의 카메라의 파라메타를 알고 있다면 대상점의 위치는 2대의 카메라의 위치와 각각의 사진좌표로부터 삼각측량의 원리에 의해 결정될 수 있다. 그러나, 일반적으로는 카메라의 파라메타는 알 수가 없는데 이 카메라의 파라메타를 결정

Fig. 1 Calibration of Camera

하는 것을 단사진표정이라 한다.

2.2 단사진 표정원리

Fig1에 나타낸 바와 같이 카메라의 좌표계를 xyz , 단사진좌표를 xy , 지상좌표계를 XYZ 로 하고 카메라를 Z 축 둘레로 x, Y 축 둘레로 ψ , X 축둘레로 ω 만큼 회전시켰을 때에 사진을 기록한다고 한다. 이것은 기울어진 사진을 역으로 각각 x 축, y 축, z 축 둘레로 ω, ψ, x 만큼 순차적으로 회전시키면 기울어지지 않은 사진이 얻어 질 수 있음을 의미한다. 지상의 대상물 P 의 지상좌표계의 좌표를 (X, Y, Z) , 기울어진 카메라좌표계에 있어서의 좌표를 (x_p, y_p, z_p) 라면,

회전행렬을 이용해서 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = R_1 R_2 R_3 \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

여기서, (X_0, Y_0, Z_0) 는 투영중심의 절대좌표이다.

투영중심, 사진상 및 지상의 대상물이 일직선상에 있다는 공선(共線)조건으로 부터 다음식이 형성된다.

$$x = -C \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (2)$$

$$y = -C \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y$$

여기서, (X, Y, Z) 는 대상물 P의 절대좌표, (X_0, Y_0, Z_0) 는 투영중심의 절대좌표, c 는 화면거리, (x, y) 는 대응하는 사진상의 사진좌표, a_{ij} 는 회전행렬의 요소이다. 또한, 실제의 카메라에 의한 촬영에서는 렌즈 및 필름의 상태에 의해 사진좌표의 위치에 영향을 미치게 되는데 그 량을 $\Delta x, \Delta y$ 로 두었으며 식(3)으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 - \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta y &= y_0 + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{aligned} \quad (3)$$

$$r^2 = (x^2 + y^2) / c^2$$

$$\bar{x} = x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0$$

여기서, (x_0, y_0) 는 주점위치의 이동량을 나타내며, $(k_1 r^2 + k_2 r^4)$ 의

항은 방사방향의 왜곡수차(收差)에 의한 렌즈디스토션(lens distortion)을 나타낸다.

2.3 표정요소의 계산

표정요소는 알고 있는 기준점에 대한 3차원의 절대좌표와 사진좌표를 이용하여 최소자승법을 이용한 축차근사해법에 의해 결정된다. 외부표정요소($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \psi, \kappa$), 내부표정요소(c, x_0, y_0, k_1, k_2)를 합한 미지변량을 $\alpha = (X_0, Y_0, Z_0, \omega, \psi, \kappa, c, x_0, y_0, k_1, k_2)$ 로 둔다. 또한, 제 i 번의 기준점의 3차원 좌표를 (X_i, Y_i, Z_i), 사진좌표를 (x_i, y_i) ($i=1, \dots, n$)로 한다. 이것에 의해 식 (2)는 식(4)와 같이 표현 될 수 있다.

$$x_i = F(\alpha ; X_i, Y_i, Z_i) \quad (4)$$

$$y_i = G(\alpha ; X_i, Y_i, Z_i)$$

이 방정식은 비선형연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 수정 Gauss-Newton법[17]을 적용한다. 이 방법은 계산의 처음에 미지변량의 근사치를 설정하여 근사치 주위에서 테일러전개에 의한 선형화를 실시한 후 최소자승법으로 보정량을 구하여 다시 근사치를 보정한다음 계산이 수렴할 때 까지 반복하는 축차근사해법이다.

미지변량의 근사치를 α_0 라 하면 식(4)은 다음과 같이 선형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta \alpha &= F(\alpha_0 ; X_i, Y_i, Z_i) - x_i \\ \frac{\partial G}{\partial \alpha} \Delta \alpha &= G(\alpha_0 ; X_i, Y_i, Z_i) - y_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\Delta \alpha$ 는 근사치에 대한 보정량이다. F 와 G의 편미분계수는 식 (8), (9)과 같이 표시되며 $\alpha = \alpha_0 - \Delta \alpha$ 의 관계가 성립된다. 식 (5)의 우변을 각각 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 라 하면 잔차 Vx_i, Vy_i 는 식 (6)로 표시된다.

$$\begin{aligned} Vx_i &= \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta \alpha - \Delta x_i \\ Vy_i &= \frac{\partial G}{\partial \alpha} \Delta \alpha - \Delta y_i \end{aligned} \quad (6)$$

$\Delta \alpha$ 는 다음식 (7)을 최소로 하는 헤로서 구해진다.

$$S = \sum_{i=1}^n (Vx_i^2 - Vy_i^2) \quad (7)$$

얻어진 Δa 로 부터 a 를 보정하여 이를 재차 식(5), 식(6)에 대입하여 Δa 가 구해진다. 이상과 같은 절차를 Δa 가 수렴할 때 까지 반복하여 미지변량 a 를 결정한다.

2.4 3차원 위치계산

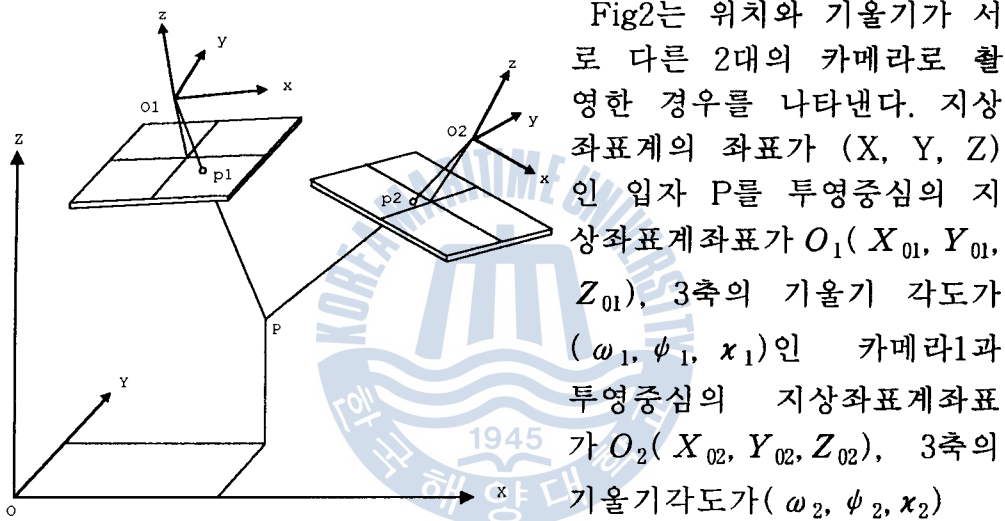


Fig. 2 Stereo-pair matching

인 카메라2로 촬영했을 때 입력된 상은 투영중심으로부터 어느거리(화면거리)만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전절에서 표정 요소가 구해지면, 투영중심, 사진상, 피사체간의 공선조건식이 결정되므로 이것을 이용하여 피사체의 3차원좌표는 다음과 같이 결정된다. 서로다른 위치로부터 한조의 입체사진을 촬영해서 각각 독립으로 단사진표정을 실행한다. 식 2를 변형하면 대응하는 한 조의 사진좌표계 (x, y) 로부터 절대좌표계 (X, Y, Z) 로의 변환은 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xp - X_0 \\ Yp - Y_0 \\ Zp - Z_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

대응하는 사진좌표 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$ 를 윗 식에 의해 사진좌표계로부터 절대좌표계로 변환하여 관측방정식을 세우면 다음식 (9)과 (10)가 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (9)과 (10)으로부터 3차원좌표(X, Y, Z)를 소거하면 다음식 (11)이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} \quad (11)$$

식(11)로부터 미지변수를 (t_1, t_2) 로써 정규방정식을 세워서 풀면 구하는 3차원좌표(X, Y, Z)는 다음식 (12)로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} \\ Y_{01} + Y_{02} \\ Z_{01} + Z_{02} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} \right] \quad (12)$$

3. 실험장치 및 실험방법

Fig3은 본 연구에 사용한 화상처리시스템의 구성을 보여주고 있다. 2대의 흑백 CCD카메라(Sony, SSC-M370)를 계측대상물을 향하여 설치한다. 카메라로부터 입력된 화상은 각각의 카메라어댑터(Sony, YS-W 130)를 통하여 이미지 그래버(Ditect, DT-16)로 입력된다.

이동하는 대상물을 촬영하기 위하여 카메라의 노출시간은 1/500초로 하였다. 이때 2대의 카메라는 같은 시각에 화상입력이 될록 동기화 시켰다. 화상처리되는 도중의 결과는 이미지그래버의 출력측에 연결되어 있는 모니터로 출력된다. 이미지그래버에 입력된 화상은 호스트 컴퓨터에 의해 2차화 및 패턴인식의 과정을 거치게 된다.

본 연구에서는 3차원측정을 하기위하여 실험의 대상물을 편이 3차원적으로 배치되어 있는 회전원판으로 하였다. 직경 8mm인 편이 회전

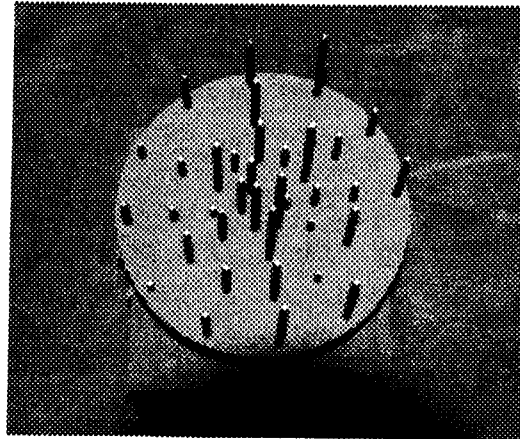


Fig.3 Picture of basic marks

원판에 대해 수직성을 유지하도록 회전원판의 두께를 25mm로 두껍게 하였다. 각 핀들은 3차원적으로 배치되어 있으며 회전원판의 면의 수직방향을 절대좌표계에서의 Z축방향으로 하고 면의 가로방향을 절대좌표계의 X방향, 세로방향을 절대좌표계의 Y방향으로 하였다. 또한 핀의 식별을 쉽게하기 위하여 핀의 말단부에 흰색의 도료를 발랐다. 핀의 설계치길이는 15mm에서 117mm까지 각각 다른 42개를 표시하고 있다. 이들 42개의 핀들을 공작하는 과정에서 오차가 유발되어 설계치와 제작치가 다르기 때문에 기준점의 3차원위치를 결정하기 위하여는 버니어캘리퍼스로 핀의 실제길이를 측정할 필요가 있다. 핀의 실제길이는 표1의 핀높이와 같고 이 핀높이가 Z축의 좌표로 사용된다. 또한 절대좌표계의 X 및 Y좌표를 구축하기 위해 사용되는 원판중심과 42개의 핀구멍과의 중심거리도 표1에 나타낸다. 이들 치수들은 10회이상의 반복측정한 후 평균해서 얻어낸 값들이다. 본 연구에서 구축한 계측시스템의 계측오차정도확인과 카메라의 교정작업을 위해 이 회전원판을 정지한 상태에서 3차원계측 실험을 실시한다. 또한 유동장의 3차원 계측에 적용의 가능성 여부를 확인하기 위하여 회전원판을 회전시켜서 원판상에 배치되어 있는 36개의 핀의 3차원의 운동을 계측한다.

유동장의 유속을 3차원적으로 계측하는 것과 같은 운동을 재현하기 위하여 Fig3의 실물을 회전시켜서 원판위에 3차원적으로 배치되어

있는 36개의 핀들의 속도벡터를 계측하는 실험을 했다. 전절에서 설명한 실험1의 조건하에서 원판의 회전속도를 20rpm, 29rpm, 45rpm, 60rpm, 실험2의 조건하에서 19rpm, 30rpm, 43rpm, 59rpm, 84rpm씩 회전시켜 각각 3차원 속도벡터를 계측하였다.

먼저 움직이는 핀의 3차원적 추적을 위해서 2대의 카메라에 대한 파라메타를 구해야만 한다. 여기서는 실험1과 실험2에 사용되었던 실험조건과 동일한 조건에서 운동모형실험을 하므로 전절의 정지모형 실험에서 구했던 카메라파라메타를 그대로 이용한다. 실험1의 조건에서 정지모형에 대한 사진을 이미지보오드에 기록하고나면 각 rpm으로 회전하고 있는 원판의 사진을 16frame 연속적으로 이미지보오드에 기록한다. 실험1에 대한 작업이 끝나면 실험2의 조건에서도 같은 방식으로 16frame 연속적으로 이미지보오드에 기록한다. 일단 이미지에 대한 기록작업이 끝나면 각 실험조건에서 기록해 두었던 이미지 frame을 각각의 카메라에 대해서 4frame 씩 불러 들여 8frame의 field보간의 화상으로 만든다. 이렇게 만들어진 8frame에 대해 이치화를 실행하여 이치화화상에 대한 입자들의 중심을 구한다.

본 연구에서는 3차원의 경로를 결정하기 위하여 먼저 2차원의 경로를 결정한다. 즉 3차원의 경로는 동일한 2차원의 경로를 찾아냄으로써 결정이 된다. 2차원의 경로를 찾는 방법은 고바야시등[4]의 방법인 어느 한 입자에 대하여 이동경로가 복수로 여겨질 수 있는 경우에는 각 시각간의 이동거리의 표준편차가 최소인 경로를 선택하는 방법을 도입했다. 2차원 시간추적방법에 대한 설명을 위한 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 시각1의 어떤 입자의 중심위치를 중심으로 하는 어느 정도의 크기(R_{wx}, R_{wy})의 장방형영역을 시각2의 입자의 예상존재범위로 선정한다.

(2) 그 범위중에 시각2의 입자가 발견되었을 때에는 그들의 입자번호를 기억하고 그 입자에 대해서 각각 다음의 절차를 수행한다.

(3) 시각 1-2 사이의 입자의 이동거리 R_1 을 구해 기준치 R_{min} 과 비교한다.

(a) $R_1 \leq R_{min}$ 인 경우

발견된 시각2의 입자의 중심위치를 중심으로 반경 $2R_{min}$ 의 원의 영역을 시각3의 입자의 예상범위로 한다.

(b) $R_1 \geq R_{\min}$ 인 경우

발견된 시각2의 입자의 중심위치를 중심으로 내경 $0.5 R_1$, 외경 $1.5 R_1$ 으로 시각1-2의 벡터의 연장선을 중심으로 양측으로 60° 의 부채꼴영역을 시각3의 예상존재범위로 한다. 여기서 1시각 전의 입자로부터 이동거리에 의해서 입자의 예상존재범위를 나누었지만, 이것은 입자의 이동거리가 짧을 때에는 다음에 입자가 이동하는 방향의 변화가 크지만 입자의 이동거리가 클 때에는 이동하는 방향의 변화가 적기 때문이다.

(4) 그 범위 중에 시각3의 입자가 발견되면 그들의 입자의 번호를 기억하고 그 입자에 대해서 각각 다음사항을 실행한다.

(5) 이하는 동일하게 (3)(4)의 처리를 입자3,4,5,6,7에 대해서 실행한다.

(6) (5)까지의 과정에서 시각1에서 시각8까지의 입자가 입자번호를 기준으로 대응된 것이 된다. 그 대응 결과를 사용하여 시각1 → 시각2사이, 시각2 → 시각3사이, ..., 시각7 → 시각8사이의 입자의 벡터를 계산하여 그 벡터의 크기의 표준편차를 구해 시각1에서 시각8까지의 대응정보와 함께 그의 표준편차도 기억한다.

(7) 이상의 작업을 시각1에서의 모든 입자에 대하여 실행함에 의하여 시각1에서 시각8까지의 입자의 경로가 정해진다.

(8) 위에서 구한 모든 이동경로에 대해서 시각1의 어떤 입자에 대해서 복수의 이동경로가 있는지를 조사해서 2중대응이 발견되었을 경우에는 그중에서 표준편차가 제일 적은 것을 선택한다. 이 작업에 의하여 시각1의 어떤 입자에 대해서 최종적으로 대응이 결정된다.

(9) 이 작업을 사진좌표계1(카메라1), 사진좌표계2(카메라2)에 대하여 실행한다.

이상에서 입자의 시간적인 2차원 추적이 종료된다.

동시각의 두장의 사진이 주어졌다고 했을 때 사진좌표계 1에 있는 입자가 사진좌표계 2의 어느 입자에 대응하는지를 알면 제2장에 기술한 방법으로 그 입자의 3차원좌표를 구할 수가 있다. 따라서, 2장의 사진간에 동일한 입자의 대응을 알기만 하면 입자들의 3차원좌표가 결정된다. 이와같이 2장의 사진간에서의 동일입자를 판별하는 것을 스테레오매칭이라고 한다. 본 연구에서는 입자의 중심위치를 대응의 대상으로 하여 스테레오매칭을 실시하였다. 또한 스테레오매칭의 판단기준을 2개의 사진좌표계의 각각에 있어서의 투영중심과 사

진좌표상의 점을 잇는 두 직선간의 거리가 최소로 되는 것으로 하였다. 사진좌표계1의 각각의 입자에 대해서 사진좌표계2의 모든입자를 적용대상으로 하여 앞서 설명한 두 직선간의 거리를 구하여 거리가 작은 순으로 추출하여 그 때의 사진좌표계2의 입자번호를 거리가 작은 순으로 3개만 기억해 둔다. 이 작업을 사진좌표계1의 모든 입자에 대하여 실시한다. 다음으로, 사진좌표계1의 각각의 입자에 대해서 거리가 보다 작은 사진좌표계2의 입자를 선택하여 그 거리가 어느 기준치를 넘으면 사진좌표계1의 그 입자에 대하여 사진좌표계 2의 대응입자는 없는 것으로 판정한다. 그 다음 사진좌표계1의 서로 다른 2개 이상의 입자에 대하여 사진좌표계 2의 동일입자를 대응하고 있지 않은지를 조사한다. 즉, 동일입자가 대응할 때에는 거리가 짧은 쪽의 사진좌표계1의 입자를 우선으로 했다. 스테레오매칭 작업을 끝낸 뒤에 대응이 된 입자들의 사진좌표를 이용하여 3차원위치를 계산하였다. 또한, 앞에서 구한 2차원의 경로정보는 3차원의 대응작업을 간소화 하기위하여 이용된다. 즉, 사진좌표계 1의 제1시각과 사진좌표계2의 제1시각에서의 한 입자에 대한 3차원대응을 결정하면 나머지 시각에서는 2차원의 경로정보만으로도 3차원대응이 쉽게 이루어지기 때문이다. Fig4는 3차원 속도벡터를 8시각 측정법에 의하여 구한 결과이다. Fig5는 원판의 회전속도가 45rpm일때의 3차원 속도 벡터를 추적한 결과이다.

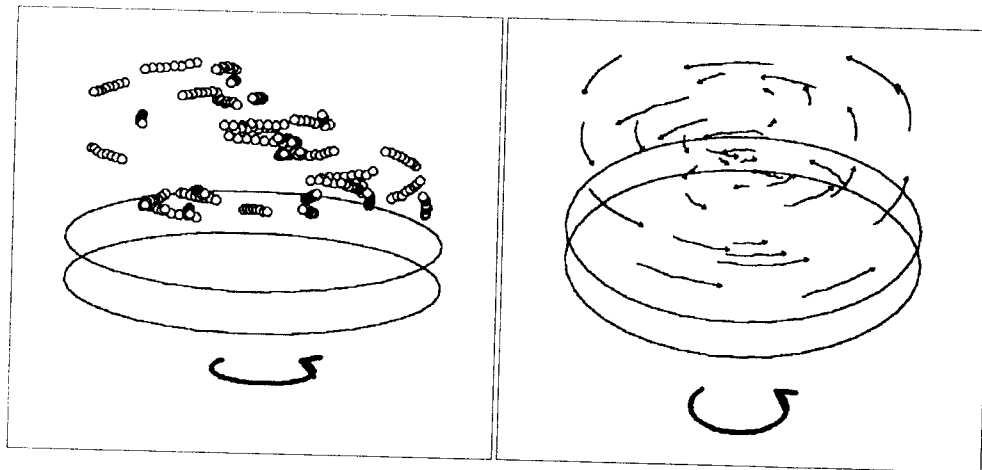


Fig.4 3D-Trajectory

Fig.5 3D- Velocity Vectors

제 4 장 결 론

디지털 화상처리를 이용한 스테레오사진법을 원리로 하는 3차원위치측정시스템을 구축하여 원판회전상에 3차원적으로 배치되어 있는 핀들의 회전속도계측을 실시하여 양호한 결과를 얻었으며 이 계측법의 유효성을 확인하였다.

본 계측법은 2대의 비측정용 CCD카메라를 이용하여 유동장의 비접촉 3차원계측에 의거하고 있기 때문에 차후 비정상유동장의 3차원계측에도 응용이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. A. J. Grass, Structural features of turbulents flow over smooth and rough boundaries, Journal of Fluid Mech., 1971, Vol. 50, pp.233-255.
2. N. Kasagi, K. Nishino, and M. Hirata, Flow visualization and its digital image processing in a full-developed two-dimensional turbulent channel flow, Proc. Int. Symp. on Fluid Control and Meaurement, Tokyo, Japan, 1985, Vol. 2, pp.723-728.
3. Kobayashi, T., Yoshitake, K., 유적사진 자동처리 시스템의 개발, 일본기계학회논문집(B), 1984, Vol.51, No.466, pp.162-167.
4. Kobashi, T., Saga, T., Segawa, S., 2차원 유동장의 실시간 화상계측의 일예, Flow Visualization(일본), 1987, Vol.7, No.26, pp.289-292.
5. Dimotakis, P.E., Debuussy, F.D. and Koochesfahani, M.M., Particle streak velocity field measurements in two-dimensional mixing layer, Physics of Fluids, 1981, Vol.24, No.6, pp.995-999.
6. Imaichi, K., Chiga, W., 가시화 화상의 수치적처리, 일본기계학회 논문집(B), 1982, Vol.4, No.436, pp.2449-2459.

7. Watanabe, G., Kaga, S., Inoue, G., Yamaguchi, K., 화상처리를 이용한 입자추적에 의한 유동장의 정량적해석, 공기조화 위생공학 논문집(일본), 1986, pp.641-644.
8. Watanabe, G., Kaga, S., Inoue, G., Yamaguchi, K., VTR을 이용한 입자추적에 의한 유동장의 계측, Flow Visualization(일본), 1987, Vol.7, No.26, pp.301-304.
9. Ayukawa, K., and Kuriowa, M., Three-dimensional visualization of flow and its application to investigation of the investigation of turbulent flow, Proc. 2nd International Symp. on Flow Visualization, 1981, pp.899-703.
10. Nedderman, R. M, The measurement of velocities in the wall region of turbulent liquid pipe flow, Chemical Engineering Science, 1961, Vol.16, pp. 120-126.
11. Kobayashi, T., Ishihara, Ca., Yayogi, N., 스테레오 사진법에 의한 유동장의 정량적 측정에 관한 연구. 일본기계학회 제 917회 강연논문집, 1982, No.820-10.
12. Sheu, Y.H.E., Chang, T. P. and Tatterson, G.B., A three-dimensional measurement technique for turbulent flows, Chemical Engineering Commun., 1982, Vol.17, pp.67-83.
13. Chang, T. P. and Tatterson, G. B., An automated analysis method for complex three dimensional mean flow field, Proc. 3rd International Symp. on Flow Visualization, 1983, pp.266-273.
14. Chang, T. P., Wilcox, N. A., and Tatterson, G. B., Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow field, Optical Engineering, 1984, Vol.23, No.3, pp.283-287.
15. Utami, T., and Ueno, T., Visualization and picture processing of turbulent flow, Experiments in Fluids, 1984, Vol.2, pp.25-32.

16. Yamamoto,F., Uemura,T., Iguchi, M., Ohta, J., Wada,A. and Mori,K., 3D PTV based on binary image correlation method and its application to a mixing flow with a bubbling jet, Computational Methods and Experiments VI,1993, Vol.1, pp.229-246.
17. 동경대학출판회편, 최소자승법에 의한 실험데이터해석.

