

〈論 文〉

스튜어트 플랫폼 순기구학 해의 실시간 추정기법

정규홍* · 이교일**

(1993년 12월 7일 접수)

Real-Time Estimation of Stewart Platform Forward Kinematic Solution

G. H. Jung and K. I. Lee

Key Words : Stewart Platform(스튜어트 플랫폼), Motion Simulator(운동재현기), Forward Kinematics(순기구학), Real-Time Estimation(실시간 추정), Kalman Filter(칼만 필터)

Abstract

The Stewart Platform is a six-degree-of-freedom in-parallel-actuated manipulator mechanism. The kinematic behavior of parallel mechanisms shows inverse characteristics as compared that of serial mechanisms ; i. e, the inverse kinematic problem of Stewart Platform is straightforward, but no closed form solution of the forward kinematic problem has been previously presented. Thus it is difficult to calculate the 6 DOF displacement of the platform from the measured lengths of the six actuators in real time. Here, a real-time estimation algorithm which solves the Stewart Platform kinematic problem is proposed and tested through computer simulations and experiments. The proposed algorithm shows stable convergence characteristics, no estimation errors in steady state and good estimation performance with higher sampling rate. In experiments it is shown that the estimation result is the same as that of simulation even in the presence of measurement noise.

기 호 설 명

A_{xyz} : 베이스좌표계

B_{xyz} : 플랫폼좌표계

\overline{BP}_i : 베이스에 고정된 액추에이터 끝점의 좌표

$\vec{e}_r, \vec{e}_p, \vec{e}_y$: rpy 각 좌표계에서의 단위벡터

l_i, \dot{l}_i : 액추에이터 길이 및 길이변화에 의한 속도

l_{ei}, \dot{l}_{ei} : 액추에이터 추정길이 및 길이변화에 의한 추정속도

Δl_{ei} : 추정오차 (= $l_i - l_{ei}$)

\overline{M}' : Plüker좌표계 모멘트벡터

\overline{P}_{BORG} : 플랫폼좌표계 원점의 선형 변위벡터

\overline{PP}_i : 플랫폼에 고정된 액추에이터 끝점의 좌표

R_i^B : 회전변환행렬

\overline{S}' : Plüker좌표계 방향벡터

\overline{U}' : Plüker좌표계 (= $[\overline{S}' \overline{M}']^t$)

\overline{V}_{BORG} : 플랫폼좌표계 원점의 선형속도벡터

$\overline{\omega}_{BORG}$: 플랫폼좌표계의 각속도벡터

첨자

B : 베이스좌표계로 기술된 벡터

P : 플랫폼좌표계로 기술된 벡터

1. 서 론

* 정회원, 현대자동차(주) 마북리연구소

** 정회원, 서울대학교 기계설계학과

자유도를 갖고며 일반적으로 3개의 선형변위와 3개의 각변위로 기술된다. 운동재현기(motion simulator)는 시간에 따라 변화되는 운동상태를 재현시킴으로써 비행체 조종사의 조종훈련이나 모사대상 운동체에 탑재되는 개발장비의 성능평가를 보다 안전하고 효과적으로 수행하기 위한 운동모사장치이다. 스튜어트 플랫폼(stewart platform)은 평판구조물의 플랫폼에 연결된 6개의 선형 액추에이터(actuator)에 의하여 플랫폼의 6자유도운동을 재현시키는 운동재현기이며 작은 구동력의 액추에이터로 큰 부하를 구동시킬 수 있는 병렬운동기구(in-parallel mechanism)의 대표적인 형태이다.⁽¹⁾

Fig. 1은 스튜어트 플랫폼의 도식적구조를 나타내며 플랫폼의 6자유도운동은 6개 구동 액추에이터 운동의 조합으로 이루어지는 특성을 갖는다. 운동재현기에서 모사되는 운동상태를 실제의 모사대상 운동체에 근접시키기 위하여는 제어기에 의한 폐회로(closed-loop) 설계가 필수적이며 이를 위하여 플랫폼의 현재 운동상태가 계측기에 의하여 측정되어야 한다. 그러나 스튜어트 플랫폼은 구동방식상 플랫폼의 6자유도운동을 나타내는 선형변위와 각변위의 측정이 매우 어렵다는 단점이 있다. 공간상에서 운동하는 물체의 상태측정을 위하여 3개의 자이로스코프(gyroscope)와 3개의 가속도계(accelerometer)로 구성되는 관성항법장치(inertial navigation system)는 고가이고 플랫폼의 운동상태 측정정밀도를 보장할 수 없으며 광학을 이용한 측정방식도

가능하나 아직 스튜어트 플랫폼에 적용되어 시도된 바 없다.

따라서 기존의 스튜어트 플랫폼방식 운동재현기의 제어방식은 모사대상 운동체의 6자유도운동으로부터 스튜어트 플랫폼의 역기구학(inverse kinematics)을 이용하여 구한 각 선형 액추에이터의 변위를 단일 입출력제어기의 기준입력(reference input)으로 인가하는 방식을 택하고 있다. 그러나 역기구학의 해가 용이하게 구하여지는 반면 순기구학(forward kinematics)의 해는 Nanua,^(2,3) Merlet⁽⁴⁾ 등이 보다 간단한 형태의 해를 구하고자 노력하였으나 닫힌형태의 해(closed form solution)로 표현되지 않고 하나의 변수를 갖는 고차의 다항식(polynomial equation) 해로 나타내게 된다. 그러므로 측정된 각 액추에이터의 길이정보로부터 실제로 모사되는 플랫폼 6자유도운동변위의 실시간 연산이 곤란하므로 성능평가를 위하여 운동재현기에 탑재되는 개발장비로 안정화(stabilization)설계에 필수적인 운동재현기의 실제 운동상태정보를 넘겨줄 수 없다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 스튜어트 플랫폼을 구동시키는 각 액추에이터의 측정된 변위로부터 플랫폼의 6자유도 변위를 실시간으로 추정하는 기법을 제안하였으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 추정기법의 성능검증 및 적용가능성을 확인하였다.⁽¹⁵⁾

2. 스튜어트 플랫폼 6자유도변위 정의 및 좌표변환

Fig. 2는 베이스(base)가 고정된 상태에서 베이스에 고정된 A_{xyz} 좌표축이 6자유도운동 후 B_{xyz}

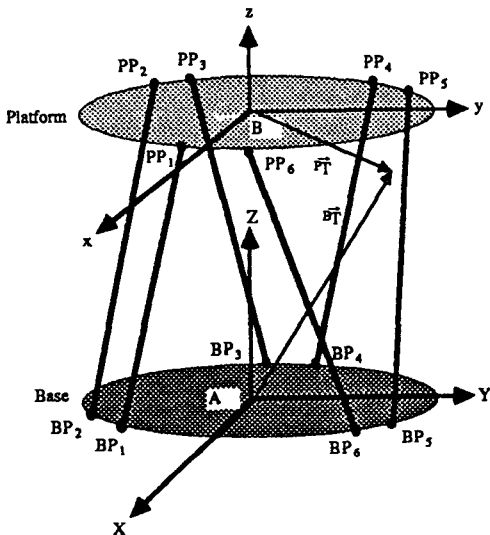


Fig. 1 Stewart Platform as a motion simulator

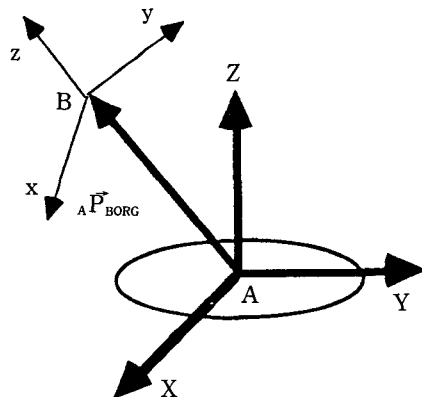


Fig. 2 DOF motion Platform

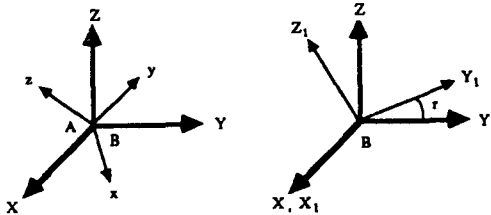
좌표축으로 이동된 상태를 나타낸다. 두 좌표축 사이에 원점이 이동된 거리를 나타내는 위치벡터 ${}^A\vec{P}_{BORG}$ 의 구성요소 중 X축 방향으로 이동거리를 Surge, Y축 방향으로의 이동거리를 Sway, Z축 방향으로의 이동거리를 Heave라 정의하면 ${}^A\vec{P}_{BORG}$ 는 다음과 같다.

$${}^A\vec{P}_{BORG} = [Sg \ Sw \ He]^t \quad (1)$$

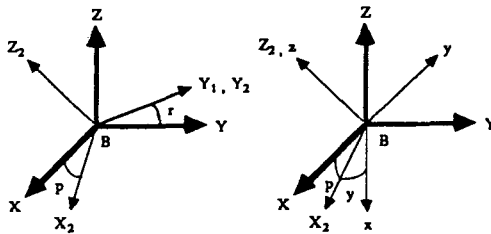
Fig. 3(a)는 A_{XYZ} 좌표축이 ${}^A\vec{P}_{BORG}$ 벡터에 해당되는 선형운동후 A점과 B점이 일치된 상태를 나타내며 이동된 A_{XYZ} 좌표축을 B_{XYZ} 이라고 하면 B_{XYZ} 좌표축과 B_{xyz} 좌표축간의 회전각변위를 다음과 같은 순서로 정의한다.

- (i) B_{XYZ} 좌표축으로부터 X축을 기준으로 하여 r만큼 회전하여 $B_{X_1Y_1Z_1}$ 좌표축의 방향을 갖고(Roll 운동, Fig. 3(b)참조)
- (ii) $B_{X_1Y_1Z_1}$ 좌표축으로부터 Y_1 축을 기준으로 하여 p만큼 회전하여 $B_{X_2Y_2Z_2}$ 좌표축의 방향을 갖고(Pitch운동, Fig. 3(c)참조)
- (iii) $B_{X_2Y_2Z_2}$ 좌표축으로부터 Z_2 축을 기준으로 하여 y만큼 회전하여 B_{xyz} 좌표축과 일치한다.(Yaw 운동, Fig. 3(d)참조)

이상과 같은 플랫폼의 6자유도변위 정의에 따라 A_{XYZ} 좌표축과 B_{xyz} 좌표축 사이의 벡터관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾



(a) Origin of A_{XYZ} and B_{xyz} are coincided after linear motion (b) Roll motion



(c) Pitch motion (d) Yaw motion

Fig. 3 Roll, Pitch, Yaw motion of Platform

$${}^A\vec{r} = R_A^{BB} \vec{r} + {}^A\vec{P}_{BORG} \quad (2)$$

여기서,

${}^A\vec{r}$: A_{XYZ} 좌표축으로 기술된 위치벡터

\vec{r} : B_{xyz} 좌표축으로 기술된 위치벡터

${}^A\vec{P}_{BORG}$: A_{XYZ} 좌표축에서 기술된 B_{xyz} 좌표축의 원점벡터

R_A^B : B_{XYZ} 좌표축과 B_{xyz} 좌표축 사이의 회전변환행렬

$$= Rot(X, r) Rot(Y_1, p) Rot(Z_2, y)$$

$$= \begin{bmatrix} CpCy & -CpSy & Sp \\ SrSpCy + CrSy & -SrSpSy + CrCy & -SrCp \\ -CrSpCy + SrSy & CrSpSy + SrCy & CrCp \end{bmatrix}$$

3. 스튜어트 플랫폼의 기구학

베이스와 플랫폼을 연결하는 액추에이터를 하나의 직선으로 생각하면 이들의 위치는 직선좌표계의 하나인 Plüker좌표계로 나타내는 것이 편리하다.⁽⁶⁾ Fig. 4에 \vec{Q}_1 과 \vec{Q}_2 가 서로 다른 벡터라고 가정하면

$$\vec{S}' = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$$

$$\vec{M}' = \vec{Q}_1 \times \vec{Q}_2 = \vec{Q}_1 \times \vec{S}' = \vec{Q}_2 \times \vec{S}' \quad (3)$$

식(3)으로 부터 Plüker좌표계는 식(4)로 정의되며

$$\vec{U}' = [S'_x \ S'_y \ S'_z \ M'_x \ M'_y \ M'_z]^t \quad (4)$$

정규화된 Plüker좌표계는 식(5)와 같다.

$$\vec{U} = [S_x \ S_y \ S_z \ M_x \ M_y \ M_z]^t \quad (5)$$

여기서, $\vec{S} = \vec{S}' / |\vec{S}'|$, $\vec{M} = \vec{M}' / |\vec{S}'|$

\vec{M} 은 Plüker좌표계의 모멘트(moment) 벡터로서 기구학만을 다루는 본 연구에서는 이용되지 않는다.

3.1 실린더 길이를 구하는 문제 : 역기구학

베이스에 고정된 6개 액추에이터 끝점의 좌표들

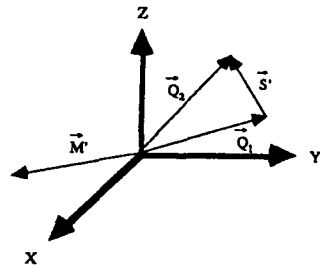


Fig. 4 The unnormalized Plüker coordinates of the line through points Q_1 and Q_2

A_{XYZ} 에서 각각 $\overline{BP}_i (BP_{ix0}, BP_{iy0}, BP_{iz0})$ 로 나타내고 플랫폼에 고정된 끝점의 좌표를 B_{xyz} 에서 각각 $\overline{PP}_i (PP_{ix0}, PP_{iy0}, PP_{iz0})$ 로 표시하면 플랫폼이 초기위치로부터 Surge, Sway, Heave의 선형운동과 Roll, Pitch, Yaw의 회전운동 후 변화된 예추에이터의 길이를 플랫폼에 고정된 좌표계 B_{xyz} 을 기준으로하여 나타내면 다음식과 같다. 이후 표시되는 벡터에서 베이스에 고정된 A_{XYZ} 좌표축을 기준으로 기술되면 첨자 B 를, 플랫폼에 고정된 B_{xyz} 좌표축을 기준으로 기술되면 첨자 P 를 좌측상단에 표기한다.

$$\begin{aligned} {}^P\overline{S}'_i &= {}^P\overline{PP}_i - {}^P\overline{BP}_i \\ &= {}^P\overline{PP}_i + R_P^\beta ({}^B\overline{P}_{BORG} - {}^B\overline{BP}_i) \\ &= \begin{bmatrix} {}^P PP_{ix0} \\ {}^P PP_{iy0} \\ {}^P PP_{iz0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CpCy & SrSpCy + CrSy \\ -CpSy & -SrSpSy + CrCy \\ Sp & -SrCp \\ -CrSpCy + SrSy \\ CrSpSy + SrCy \\ CrCp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sg - {}^B BP_{ix0} \\ Sw - {}^B BP_{iy0} \\ He - {}^B BP_{iz0} \end{bmatrix} \\ &= [{}^P S'_{ix} \quad {}^P S'_{iy} \quad {}^P S'_{iz}]^t \end{aligned} \quad (6)$$

위의 관계식으로부터 각 예추에이터의 길이 l_i 는 식(7)로 구해지며 ${}^P\overline{S}'_i$ 방향으로의 단위벡터는 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} l_i &= |{}^P\overline{S}'_i| = \sqrt{{}^P\overline{S}'_i \cdot {}^P\overline{S}'_i} \\ &= [({}^P S'_{ix})^2 + ({}^P S'_{iy})^2 + ({}^P S'_{iz})^2]^{1/2} \quad (7) \\ {}^P\overline{S}'_i &= {}^P\overline{S}'_i / |{}^P\overline{S}'_i| = [{}^P S'_{ix} / l_i \quad {}^P S'_{iy} / l_i \quad {}^P S'_{iz} / l_i]^t \\ &= [{}^P S_{ix} \quad {}^P S_{iy} \quad {}^P S_{iz}]^t \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 플랫폼의 6자유도변위를 구하는 문제 : 순기구학

6개 선형 예추에이터의 길이가 주어졌을 때 플랫폼의 6자유도변위를 구하는 문제는 다음의 식(9)로 표현되는 각 예추에이터길이의 구속조건으로부터 구할 수 있다.

$$l_i = |{}^P\overline{S}'_i| = [({}^P S_{ix})^2 + ({}^P S_{iy})^2 + ({}^P S_{iz})^2]^{1/2} \quad (9) \quad i=1 \sim 6$$

만약 스튜어트 플랫폼이 특이위치(singular position)을 갖지 않는다고 하면 식(9)의 해는 유일하다. 식(9)에서 ${}^P\overline{S}'_i$ 는 식(6)과 같고 식(9)의 좌변은 주어진 각 실린더의 길이로서 상수이며 우변은 플랫폼 6자유도변위인 Sg, Sw, He, r, p, y 의 2차식으로 표현되므로 순기구학(forward kin-

ematics)하는 6원 2차 연립방정식의 해로 나타나게 된다. 따라서 이와같은 순기구학문제를 닫힌형태의 해로 구하는것은 불가능하며, 비선형 연립방정식의 해를 구하는 수치해석법을 이용하여 플랫폼의 6자유도변위를 구하는 것은 가능하다.

3.3 플랫폼의 6자유도 속도를 구하는 문제 : 순간속도 순기구학

순간속도 순기구학(instantaneous forward kinematics)에 관한 연구는 Shi,⁽⁷⁾ Mohamed⁽⁸⁾ 등에 의하여 연구되었으나 본 논문에서는 플랫폼좌표계 원점의 선속도벡터와 각속도벡터가 주어진 경우에 대하여 보다 간단한 형태로 해가 표현되는 해법을 이용하였다. 플랫폼에 연결된 예추에이터 끝점의 속도는 길이 변화에 의한 속도성분과 방향변화에 의한 속도성분으로 이루어지며 플랫폼의 선속도와 각속도가 주어지면 식(10)으로 표현된다. 단, 여기서는 간략화된 식 유도과정을 위하여 플랫폼좌표계 B_{xyz} 이 전술된 플랫폼좌표계의 위치와 방향을 갖고 베이스좌표계 A_{XYZ} 에서 고정된 상태라고 가정한다.

$${}^P\dot{\overline{PP}}_i = {}^P\overline{V}_{BORG} + {}^P\overline{\omega}_{BORG} \times {}^P\overline{PP}_i \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} {}^P\dot{\overline{PP}}_i &= R_P^\beta \frac{d}{dt} ({}^P\overline{PP}_i) \\ {}^P\overline{V}_{BORG} &= R_P^{PP} \overline{V}_{BORG} \\ {}^P\overline{\omega}_{BORG} &= R_P^{PP} \overline{\omega}_{BORG} \\ {}^P\overline{V}_{BORG} &= [{}^P V_{BORGX} \quad {}^P V_{BORGY} \quad {}^P V_{BORGZ}]^t \\ {}^P\overline{\omega}_{BORG} &= [{}^P \omega_{px} \quad {}^P \omega_{py} \quad {}^P \omega_{pz}]^t \end{aligned}$$

식(10)의 각속도성분을 연산하면

$$\begin{aligned} {}^P\dot{\overline{PP}}_i &= \begin{bmatrix} {}^P\dot{PP}_{ix} \\ {}^P\dot{PP}_{iy} \\ {}^P\dot{PP}_{iz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^P V_{BORGX} + {}^P PP_{iz0} {}^P \omega_{py} - {}^P PP_{iy0} {}^P \omega_{pz} \\ {}^P V_{BORGY} + {}^P PP_{ix0} {}^P \omega_{pz} - {}^P PP_{iz0} {}^P \omega_{px} \\ {}^P V_{BORGZ} + {}^P PP_{iy0} {}^P \omega_{px} - {}^P PP_{ix0} {}^P \omega_{py} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

베이스에 고정된 예추에이터 끝점의 속도는 zero이므로 ${}^P\dot{\overline{PP}}_i = {}^P\dot{\overline{S}}'_i$ 이며 길이변화에 의한 속도성분은 Plücker좌표계 ${}^P\dot{\overline{S}}'_i$ 방향벡터에 평행한 성분으로 다음 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} l_i &= {}^P\dot{\overline{S}}'_i \cdot {}^P\overline{S}'_i \\ &= C_{ix} {}^P V_{BORGX} + C_{iy} {}^P V_{BORGY} + C_{iz} {}^P V_{BORGZ} \end{aligned}$$

$$+ C_{i\omega x} {}^P\omega_{px} + C_{i\omega y} {}^P\omega_{py} + C_{i\omega z} {}^P\omega_{pz} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_{ivx} &= {}^P S_{ix} \\ C_{ivy} &= {}^P S_{iy} \\ C_{ivz} &= {}^P S_{iz} \\ C_{i\omega x} &= {}^P P P_{iy0} {}^P S_{iz} - {}^P P P_{iz0} {}^P S_{iy} \\ C_{i\omega y} &= {}^P P P_{iz0} {}^P S_{ix} - {}^P P P_{ix0} {}^P S_{iz} \\ C_{i\omega z} &= {}^P P P_{ix0} {}^P S_{iy} - {}^P P P_{iy0} {}^P S_{ix} \end{aligned}$$

각 액추에이터의 길이변화에 의한 속도성분과 플랫폼좌표계에 대한 플랫폼의 선속도 및 각속도의 관계식을 이용하여 액추에이터의 길이변화에 의한 속도가 주어지면 플랫폼의 선속도와 각속도는 각 액추에이터에 대하여 표현된 식(12)로부터 행렬식을 구성하여 구할 수 있다.

$$\dot{i} = C_{vw} {}^P \vec{V} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} i &= [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5 \ i_6]^t \\ {}^P \vec{V} &= [{}^P \vec{V}_{BORGX} \ {}^P \vec{V}_{BORGY}]^t \\ &= [{}^P V_{BORGX} \ {}^P V_{BORGY} \ {}^P V_{BORGZ} \ {}^P \omega_{px} \ {}^P \omega_{py} \ {}^P \omega_{pz}]^t \end{aligned}$$

C_{vw} : 각 행이 식(12)의 계수로 구성되는 6×6 행렬 따라서 플랫폼좌표계로 기술되는 플랫폼 6자유도 속도는 식(14)와 같다.

$${}^P \vec{V} = C_{vi} \dot{i} \quad (14)$$

4. 스튜어트 플랫폼의 각속도변환

플랫폼의 선속도 및 각속도는 벡터성분이나 각변위는 벡터성분이 아니므로 2절에서 정의된 플랫폼의 각변위는 정의된 각좌표계(angle coordinate system)로 각속도성분을 분리한 후 적분하여 구하여야 한다.⁽⁹⁾ 즉, 플랫폼에 고정된 좌표축의 각속도성분은 벡터이므로 정의된 Roll, Pitch, Yaw 방향으로의 속도성분을 분리하여 구할 수 있다. Fig. 5에서 초기 O_{XYZ} 좌표축을 $\{A\}$ 좌표계라 표시하고 Roll운동 후 $\{B\}$ 좌표계, Pitch운동 후 $\{C\}$ 좌표계, Yaw운동 후 $\{D\}$ 좌표계라 나타내면 rpy 각좌표계의 단위벡터 $\vec{e}_r, \vec{e}_p, \vec{e}_y$ 는 플랫폼에 고정된 좌표축 $D(x, y, z)$ 으로 다음과 같이 분리된다.

\vec{e}_y 는 $\{D\}$ 좌표계의 z 축과 일치하므로 ${}^D \vec{e}_y = [0 \ 0 \ 1]^t$ 이며 \vec{e}_r 는 $\{B\}$ 좌표계에서 $[0 \ 1 \ 0]^t$ 로 표시되며 $B(X_1, Y_1, Z_1)$ 좌표계에서 $D(x, y, z)$ 좌표계로의

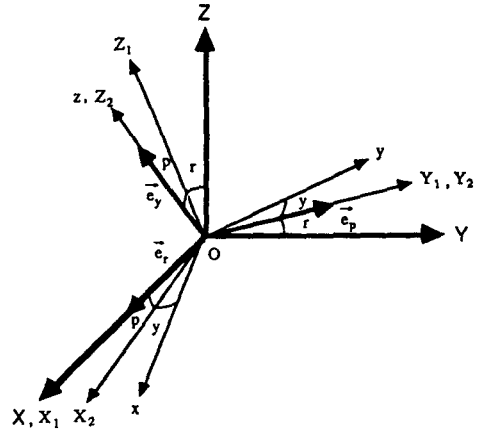


Fig. 5 Roll, Pitch, Yaw rate decomposition

회전변환행렬을 R_B^A 라하면 ${}^D \vec{e}_p$ 는 식(15)와 같다.

$${}^D \vec{e}_p = R_B^A [0 \ 1 \ 0]^t = [S_y \ C_y \ 0]^t \quad (15)$$

\vec{e}_r 는 $A(X, Y, Z)$ 좌표계에서 $[1 \ 0 \ 0]^t$ 로 표시되며 $A(X, Y, Z)$ 좌표계에서 $D(x, y, z)$ 좌표계로의 회전변환행렬을 R_D^A 라하면 ${}^D \vec{e}_r$ 는 식(16)과 같다.

$$\begin{aligned} {}^D \vec{e}_r &= R_D^A [1 \ 0 \ 0]^t \\ &= [C_p C_y - C_p S_y \ S_p]^t \end{aligned} \quad (16)$$

플랫폼좌표축에서 기술되는 플랫폼의 회전각속도는 ${}^D \vec{\omega} = \dot{r} \vec{e}_r + \dot{p} \vec{e}_p + \dot{y} \vec{e}_y$ 이므로

$$\begin{bmatrix} {}^D \omega_x \\ {}^D \omega_y \\ {}^D \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_p C_y & S_y & 0 \\ -C_p S_y & C_y & 0 \\ S_p & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{p} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(17)을 이용하여 rpy 각좌표계의 각속도($\dot{r}, \dot{p}, \dot{y}$)가 주어지면 플랫폼좌표계의 각속도를 구할 수 있으며 그 역의 경우에는 다음의 식(18)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{p} \\ \dot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_p C_y & S_y & 0 \\ -C_p S_y & C_y & 0 \\ S_p & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^D \omega_x \\ {}^D \omega_y \\ {}^D \omega_z \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{C_p} \begin{bmatrix} C_y & -S_y & 0 \\ C_p S_y & C_p C_y & 0 \\ -S_p C_y & S_p S_y & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^D \omega_x \\ {}^D \omega_y \\ {}^D \omega_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)에서 $D(x, y, z)$ 좌표계는 전술된 정의에 의하여 플랫폼좌표계 B_{xy2} 과 일치하므로 ${}^D \vec{\omega} = [{}^D \omega_{px} \ {}^D \omega_{py} \ {}^D \omega_{pz}]^t$ 는 ${}^P \vec{\omega}_{BORC} = [{}^P \omega_{px} \ {}^P \omega_{py} \ {}^P \omega_{pz}]^t$ 와 같다.

5. 6자유도변위 실시간 추정기법

이상과 같이 연구된 스튜어트 플랫폼의 기구학을 중심으로 6개 선형 액추에이터의 측정된 길이정보로부터 플랫폼의 6자유도변위, 즉 Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw를 구하는 추정알고리즘(estimation algorithm)의 연산과정은 다음과 같다.

(1) 플랫폼 6자유도 추정변위의 초기상태 (Sg, Sw, He, r, p, y)를 설정하고 이 값으로부터 스튜어트 플랫폼의 역기구학을 이용하여 각 액추에이터의 추정된 길이 l_{ei} 를 계산한다.

(2) 각 액추에이터의 측정된 길이 l_i 를 측정기로부터 받아들인다.

(3) 측정된 길이정보로부터 칼만필터(Kalman filter) 알고리즘을 이용하여 각 액추에이터의 길이 변화에 의한 선속도 \dot{l}_{ei} 를 추정한다.

(4) 추정된 \dot{l}_{ei} 로부터 3절에서 제시된 식(14)를 이용하여 플랫폼좌표축에서 기술되는 플랫폼의 각속도 ${}^P\omega_{px}, {}^P\omega_{py}, {}^P\omega_{pz}$ 과 플랫폼좌표계의 원점의 선속도 ${}^P V_{BORGX}, {}^P V_{BORGY}, {}^P V_{BORGZ}$ 를 구한다.

(5) 추정된 (r, p, y) 위치에 대하여 4절에서 제시된 각속도 변환식인 식(18)을 이용하여 ${}^P\omega_{px}, {}^P\omega_{py}, {}^P\omega_{pz}$ 로부터 $\dot{r}, \dot{p}, \dot{y}$ 를 구하고 플랫폼좌표계에서 기술된 플랫폼 원점의 선속도 ${}^P V_{BORGX}, {}^P V_{BORGY}, {}^P V_{BORGZ}$ 는 벡터변환식을 이용하여 베이스좌표계에서 기술된 플랫폼좌표계 원점의 선속도 ${}^P V_{BORGX}, {}^P V_{BORGY}, {}^P V_{BORGZ}$ 으로 변환한다.

(6) ${}^B V_{BORGX} = \dot{Sg}, {}^B V_{BORGY} = \dot{Sw}, {}^B V_{BORGZ} = \dot{He}, \dot{r}, \dot{p}, \dot{y}$ 를 적분하여 변환된 6자유도 추정변위 (Sg, Sw, He, r, p, y)를 구한다.

(7) (6)번 과정에서 갱신(update)된 6자유도 추정변위에 대한 역기구학의 해로부터 각 액추에이터의 추정된길이 l_{ei} 를 계산한다.

(8) (2)번 과정에서 측정된 액추에이터의 길이 l_i 와 (7)번 과정에서 계산된 액추에이터의 추정길이 l_{ei} 로부터 추정오차 $\Delta l_{ei} = l_i - l_{ei}$ 를 계산한다.

(9) (2)번, (3)번 과정을 통해 새로운 각 액추에이터의 길이변화에 의한 속도 \dot{l}_{ei} 를 계산한다.

(10) 추정오차 Δl_{ei} 가 zero로 수렴하도록 Δl_{ei} 와 칼만필터에서 추정된 선속도 \dot{l}_{ei} 를 추정제어기(estimation controller)에 입력하여 각 액추에이터의 선속도를 수정한다.

(11) (4)번 과정을 반복한다.

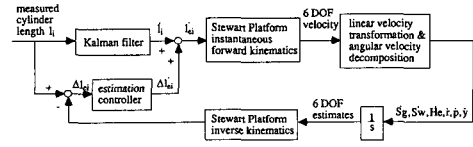


Fig. 6 Block diagram of the 6 DOF estimation algorithm

위에서 제시된 추정알고리즘은 실시간수행이 가능하며 변위추정기이외에 속도추정기가 부가되면 칼만필터를 이용한 속도추정과정 ((3)번 과정)이 생략되며 플랫폼의 각속도를 측정하는 레이트 자이로스코프(rate gyroscope)를 이용하여 플랫폼의 각속도정보를 알 수 있다면 플랫폼좌표계 원점의 선속도 ${}^B V_{BORGX}, {}^B V_{BORGY}, {}^B V_{BORGZ}$ (즉, $\dot{Sg}, \dot{Sw}, \dot{He}$)만을 (4)번 과정에서 구하면 되므로 6개의 변수를 갖는 선형방정식이 3개 변수만을 갖는 선형방정식으로 변환되어 보다 빠른속도의 추정연산이 가능하다. 마찬가지로 방법으로 플랫폼좌표계에서 서로 수직한 축방향으로 장착된 가속도계로부터 플랫폼 좌표계로 기술된 플랫폼 원점의 선속도 벡터 $[{}^P V_{BORGX} \ {}^P V_{BORGY} \ {}^P V_{BORGZ}]^T$ 를 얻을 수 있다면 (4)번 과정에서 플랫폼의 각속도 정보만을 구하면 되므로 3개의 변수만을 갖는 선형방정식으로 변환된다. Fig. 6에 제안된 추정된 추정기법의 블럭선도(block diagram)를 나타내었다.

6. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 스튜어트 플랫폼 6자유도변위 실시간 추정기법의 추정성능을 검증하기위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 선형 액추에이터의 측정된 길이로부터 속도를 추정해내는 칼만필터 모델은 각속도를 백색잡음(white noise)으로 가정하는 α - β tracker의 이산화모델(discrete-time model)을 사용하였으며 시스템잡음(process noise)과 측정잡음(measurement noise)의 분산값이 각각 1, 0.5일때의 최적칼만이득을 구하여 적용하였다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

실제 측정된 액추에이터 길이와 추정된 6자유도변위로부터 계산된 액추에이터 길이와의 오차를 zero로 만들기위하여 칼만필터에서 추정된 액추에이터의 선속도에 부가적으로 추정오차보상속도를 발생시키는 추정제어기는 비례적분제어기(PI-controller)를 사용하였으며 제어기이득은 추정알고리즘이 발산하지않는 범위내에서 추정기의 초기상태

로부터 플랫폼의 6자유도변위 추정시 다소의 오버 슈트를 허용하더라도 가장 빠른 수렴속도를 나타내는 이득값으로 선정하였다.

Fig. 7에 추정기성능을 검증하기위한 시뮬레이션 수행방법을 나타내었다. 주어진 플랫폼의 6자유도 변위로부터 역기구학을 이용하여 계산된 각 액추에이터의 길이를 측정된 변위정보로 가정하여 플랫폼의 6자유도변위를 제안된 추정알고리즘으로 연산하였다. 추정기 초기상태로부터 실제변위로 수렴하는 특성과 플랫폼 운동시 추정성능의 확인을 위하여 플랫폼의 6자유도변위가 Table 1과 같은 각 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1의 case 1에 대한 추정성능이 Fig. 8에 나타나 있다. 추정되는 플랫폼의 6자유도변위가 1 초 이후에는 모두 실제값으로 수렴됨을 알 수 있으며 선형변위와 회전각변위 추정시 과동응답상태가 동일한 양상을 나타내었다. 또한, 정상상태에 도달하면 각 액추에이터의 추정오차가 zero로 수렴하므로 플랫폼 6자유도변위의 추정오차는 발생되지 않았다. 회전각 변위와 선형변위가 초기오차로부터 수렴하는 과동응답특성이 동일한 이유는 6자유도변위 오차가 각 액추에이터의 길이오차로 환산된 후에는 수렴성능이 추정제어기의 구조 및 이득값에만 영향을 받게되는데 본 논문에서는 6개의 액추에이터에 동일한 제어기와 이득값을 적용하였기 때문이다.

Table 1의 case 2에 대한 추정성능을 Fig. 9에 나타내었으며 샘플링시간이 작아져 더욱 빠르게 수렴함을 알 수 있었다. 플랫폼의 운동시 추정기의

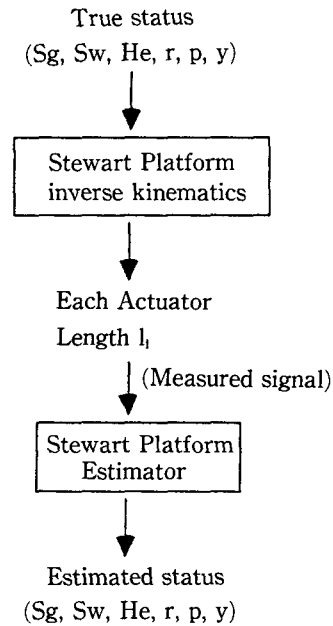


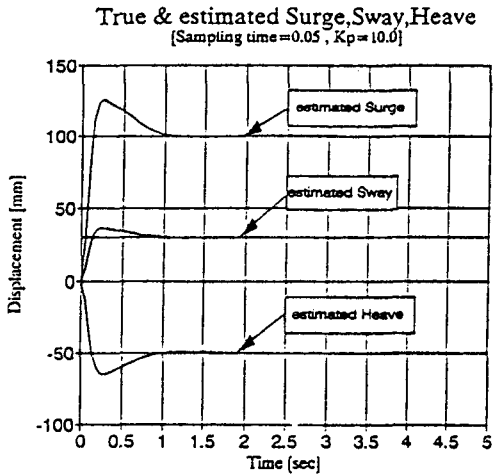
Fig. 7 Simulation algorithm for 6 DOF displacement estimator performance verification

추정성능을 확인하기 위하여 Table 1의 case 3에 대한 추정성능을 Fig. 10에 나타내었다. 변화되는 자유도의 각속도가 최대로되는 순간에 추정오차가 최대로 되며 위상차는 추정된 결과가 다소 앞섬을 나타내었으며 각 자유도간의 간섭현상은 전혀 발생되지 않았다. Fig. 11은 샘플링시간이 작은 case 4에 대한 추정성능 결과이며 Fig. 9의 결과로부터 예상된 바와 같이 샘플링시간이 작아져 더욱 우수한 추정성능을 나타내었다.

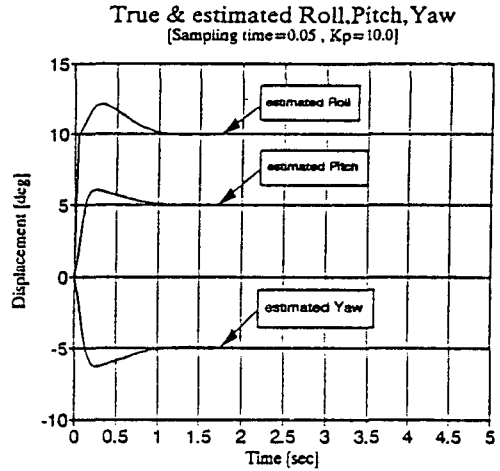
Table 1 Platform 6 DOF displacement and estimation controller

	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw	Sampling time	Kp
Case 1	100 mm	30 mm	-50 mm	10 deg	5 deg	-5 deg	0.05 sec	10
Case 2	100 mm	30 mm	-50 mm	10 deg	5 deg	-5 deg	0.01 sec	60
Case 3	0 mm	Sinusoidal	0 mm	0 deg	Sinusoidal	0 deg	0.05 sec	10
		Amp. : 100 mm Freq. : 0.3 Hz			Amp. : 100 mm Freq. : 0.3 Hz			
Case 4	0 mm	Sinusoidal	0 mm	0 deg	Sinusoidal	0 deg	0.01 sec	60
		Amp. : 100 mm Freq. : 0.3 Hz			Amp. : 100 mm Freq. : 0.3 Hz			

K_i=1.0 for all case

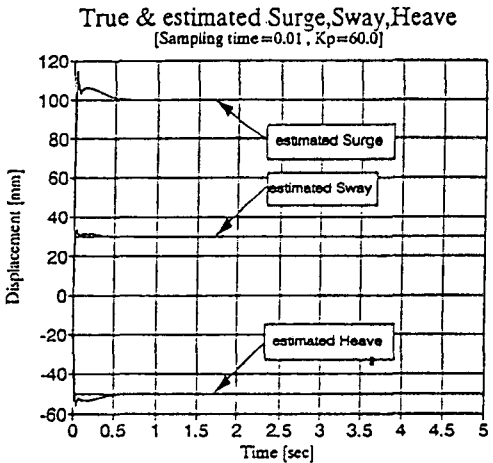


(a) Linear displacement estimation result

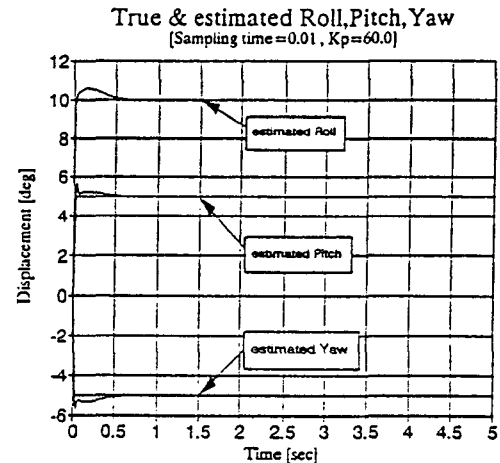


(b) Angular displacement estimation result

Fig. 8 6 DOF displacement estimation result for Stewart Platform : case 1

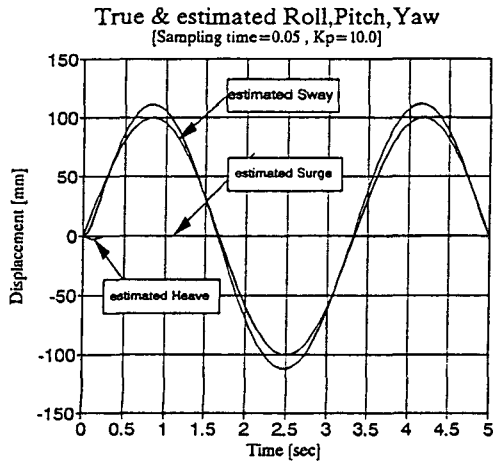


(a) Linear displacement estimation result

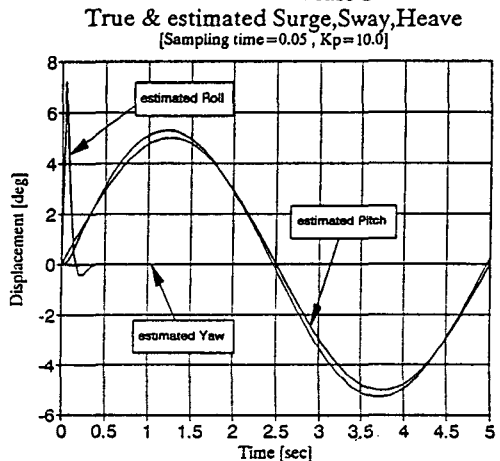


(b) Angular displacement estimation result

Fig. 9 6 DOF displacement estimation result for Stewart Platform : case 2

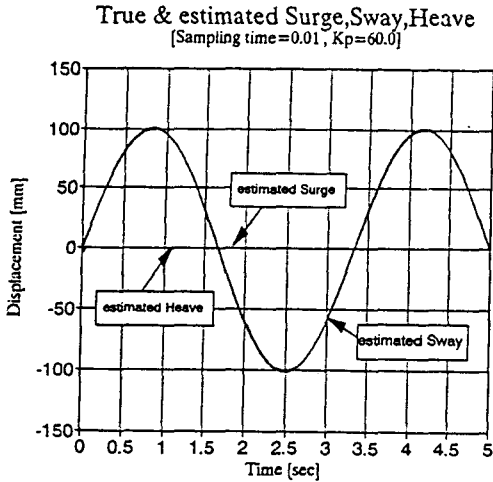


(a) Linear displacement estimation result

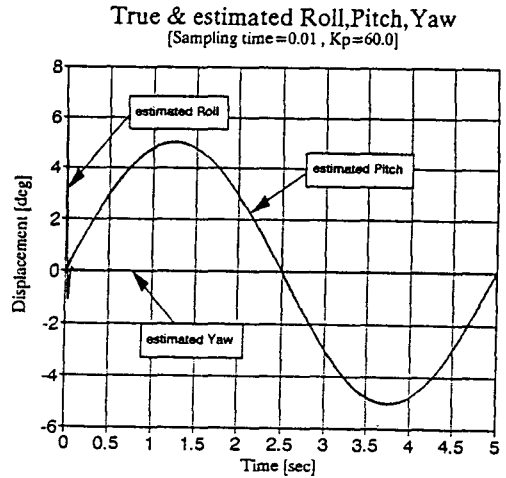


(b) Angular displacement estimation result

Fig. 10 6 DOF displacement estimation result for Stewart Platform : case 3



(a) Linear displacement estimation result



(b) Angular displacement estimation result

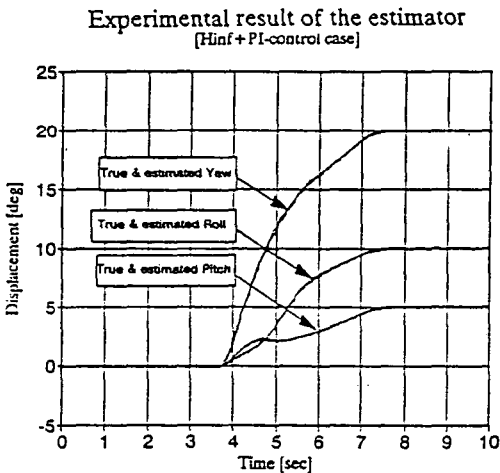
Fig. 11 6 DOF displacement estimation result for Stewart Platform : case 4

7. 실험

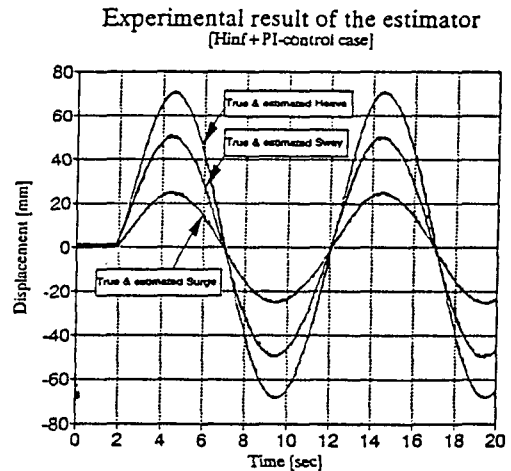
본 연구에서 제안된 6자유도변위 추정기법은 동특성이 내재되지 않은 기구학적 관계식의 해를 실시간으로 연산하는 알고리즘이므로 스투어트 플랫폼의 기하학적 형상과 관련된 데이터(data)가 정확하다면 액추에이터의 변위측정신호 오차만이 실험시의 추정성능에 영향을 미치게 된다. 측정되는 아날로그신호에 존재하는 잡음과 부정확한 A/D변환

에 의하여 추가되는 디지털 신호의 잡음이 추정성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 스투어트 플랫폼의 액추에이터는 Temposonic 변위측정기가 내장된 Moog사의 편로드 유압실린더이며 45 Hz의 80486 디지털 컴퓨터를 이용하여 50 Hz의 샘플링주파수(sampling frequency)로 추정기법을 수행하였다.

추정된 플랫폼 6자유도변위를 피드백 신호로 사용하는 $H_{\infty} + PI$ 다변수 제어기⁽¹⁴⁾에 의한 플랫폼 운동시 측정된 실린더길이로부터 플랫폼의 순기구



(a) True and estimated state(Surge, Sway, Heave motion sinusoidal input case)



(b) True and estimated state(Roll, Pitch, Yaw motion step input case)

Fig. 12 6 DOF displacement estimation result

학을 이용하여 off-line으로 구한 실제의 6자유도 변위와 추정기의 추정상태변위를 Fig. 12에 나타내었다. 실제로 모사되는 플랫폼의 6자유도변위를 실시간 추정기는 매우 우수하게 추정하였으며 발산현상과 정상상태 오차는 나타나지 않으며 디지털 신호에 존재하는 잡음에 의한 영향도 거의 나타나지 않았다.

8. 결 론

본 연구에서는 공간상에서 6자유도운동을 모사하는 스튜어트 플랫폼방식 운동재현기를 연구대상으로 하여 플랫폼을 구동시키는 6개 선형액추에이터의 길이정보로부터 6자유도변위를 실시간으로 추정하는 추정기법을 제안하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 플랫폼의 6자유도변위를 실시간으로 추정할 수 있는 추정기법을 제안하였다.

(2) 시뮬레이션을 통하여 추정기 초기상태로부터의 수렴성능과 플랫폼 운동시 추정기의 추정성능을 확인하였다.

(3) 정상상태에서의 추정오차는 발생하지 않았으며 샘플링시간이 작을수록 추정성능이 우수함을 알 수 있었다.

(4) 측정된 액추에이터길이 l_i 와 추정된 액추에이터 길이 l_{ei} 가 일치되면 추정된 플랫폼의 6자유도 변위는 실제의 값과 일치하므로 스튜어트 플랫폼의 기하학적 형상변수오차 등을 무시하면 추정결과는 실제 플랫폼의 운동상태와 동일하리라 예상된다.

(5) 추정기에서는 플랫폼의 6자유도변위 외에 플랫폼의 속도성분도 부가적으로 추정되므로 운동체에 탑재되는 장비개발시 유용한 정보의 제공이 가능하다.

(6) 액추에이터의 선속도를 측정하는 속도계와 플랫폼의 각속도를 측정하는 데이트 자이로스코프가 장착된다면 추정알고리즘의 수행시간은 대폭적으로 단축되어 보다 우수한 추종성능을 나타내리라 예상된다.

(7) 추정알고리즘의 실험결과는 측정신호에 존재하는 잡음의 영향이 거의 나타나지않는 우수한 추정성능을 나타내었으므로 운동재현기를 이용한 여타장비의 실험시 유용한 정보로 활용가능함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Stewart, D., 1965, 66, "A Platform with Six Degree of Freedom," *Proc. of the Insitute of Mechanical Engineers*, Vol. 180, Part 2, No. 15, pp. 371~386.
- (2) Nanua, P. and Waldron, K. J., 1989, "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 431~437.
- (3) Nanua, P., Waldron, K. J. and Murthy, V., 1990, "Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 6 No. 4, pp. 438~444.
- (4) Merlet, J-P., 1992, "Direct Kinematics and Assembly Modes of Parallel Manipulators," *The Int. J. of Robotics Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 150~162.
- (5) Craig, J. J., 1986, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- (6) Fichter, E. F., 1986, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction," *The Int. J. of Robotics Rearch*, Vol. 5, No. 2, pp. 157~182.
- (7) Shi, X. and Fenton, R. G., 1992, "Solution to the Forward Instantaneous Kinematics fo ra General 6-DOF Stewart Platform," *Mech. Mach. Theory*, Vol. 27, No. 3, pp. 251~259.
- (8) Mohamed, M. G. and Duffy, J., 1985, "A Direct Determination of the Instantaneous Kinematics of Fully Parallel Robot Manipulators," *ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 107, pp. 226~229.
- (9) Meirovitch, L., 1970, *Method of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill, New York.
- (10) Friedland, B., 1973, "Optimum Steady-State Position and Velocity Estimation Using Noisy Sampled Position Data," *IEEE Trans. Aerospace and electronic Systems*, Vol. AES-9, No. 6, pp. 906~911.
- (11) Bridgewater, A. W., 1978, "Analysis of Second and Third Order Steady State Tracking Filters," *AGARD Conference on Strategies for*

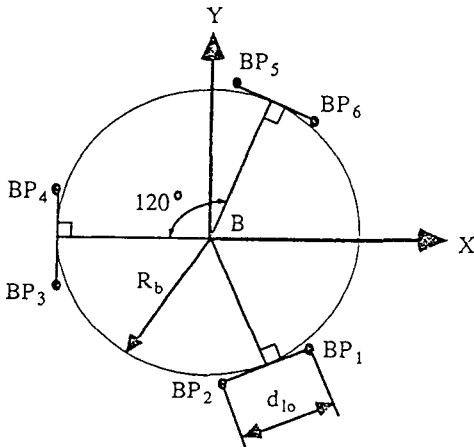
Automatic Tracking Initiation, Monterey, Calif., Oct.,

- (12) Lewis, F. L., 1986, *Optimal Estimation*, John Wiley & Sons, New York.
- (13) Maybeck, P. S., 1979, *Stochastic Models, Estimation, and Control: Volume 1*, Academic Press, New York.
- (14) 정규홍, 박철규, 이교일, 1992, "스튜어트 플랫폼방식 운동재현기의 다변수 건설제어에 관한 연구," 92년 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 736~741.
- (15) 정규홍, 박철규, 이교일, 1992, "스튜어트 플랫폼 6자유도변위의 실시간 추정기법," 대한기계

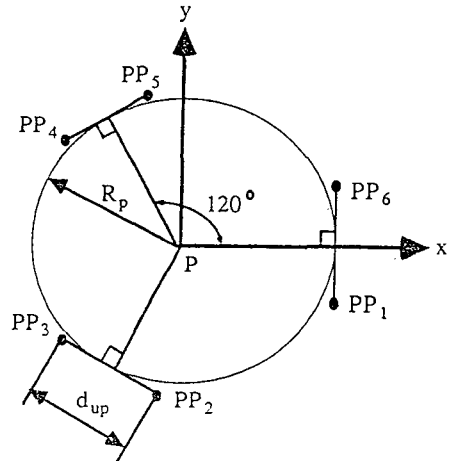
학회 춘계학술대회 초록집, Vol. 1, pp. 669~673.

부 록

Fig. A1은 베이스와 플랫폼에 연결된 6개의 실린더 끝점의 좌표를 나타내며 6자유도변위가 대칭적 운동범위를 갖도록 중심원을 기준으로 대칭되는 위치를 선정하였다. 여기서, $R_b = R_p = 900$ mm, $d_{lo} = 200$ mm, $d_{up} = 100$ mm이며 액츄에이터로 사용된 유압실린더의 사양은 초기길이가 1300 mm이며 행정길이는 800 mm이다.



(a) 6 cylinder end points in the base



(b) 6 cylinder end points in the platform

Fig. A1 Cylinder end points configuration in base and platform