碩士學位論文

원격 주행 차량용 6 축 스튜어트 플랫폼의

순기구학을 이용한 제어 및 계측

The Measurement and Control of Stewart Platform applied to the Tele-operated Vehicle System by forward kinematics

國民大學校 自動車專門大學院

李 吉 營

2001

碩士學位論文

원격 주행 차량용 6 축 스튜어트 플랫폼의 순기구학을 이용한 제어 및 계측

The Measurement and Control of Stewart Platform applied to the Tele-operated Vehicle System by forward kinematics

指導敎授　金 廷 河

이 論文을 碩士學位 請求論文으로 提出함.

2001年 12月

國民大學校　自動車工學專門大學院

李 吉 營

2001

李 吉 營 의

碩士學位 請求論文을 認准함.

2001年 12月 3日

審査委員長 李 雲 成 印

審査 委員 金 贊 默 印

審査 委員 金 廷 河 印

國民大學校 自動車工學專門大學院

電子制御 시스템

목 차

요 약

본 연구는 차량 시뮬레이터에 의한 원격주행차량에 관한 연구로서 차량 시뮬레이터의 정확하고 정밀한 운동 재현을 목적으로 한다. 먼저 전체적인 시스템은 모션 재현용 시뮬레이터 (Master System)와 원격 무인차량(Slave System)으로 크게 나뉘어 생각 할 수 있다. 무인자동차에서 나오는 주행차량의 데이터와 영상 화면이 차량 시뮬레이터의 모션 큐 가 되어 주행모션을 생성하고 시뮬레이터의 제어 큐가 원격무인차량의 주행을 조작한다. 여기서 주행차량의 데이터를 충실하게 모사하기위한 방법으로 스튜어트 플랫폼 속에 6개의 linear potentiometer를 상판과 하판에 고정시킨 2중 플랫폼 구조를 이용하여 축의 길이를 비접촉식으로 하여 상판과 하판의 상대운동을 계측하여 수식적으로 기계적 유격을 포함한 상판과 하판의 축의 길이를 계측할 수 있다. 본 논문에서는 prototype의 플랫폼을 이용하여 축 하나에 대한 기계적 유격과 마찰 외의 모든 것을 포함한 AC Servo Motor의 실험적 모델링을 통하여 더욱 정확한 모션 재현이 가능한지를 실험하였으며, 차량용 모션구현을 위한 데이터는 1/2 Car 모델을 이용하여 범프 통과시의 Roll, Pitch, Vertical 방향의 모션을 구현 하였다. 차량 모델링을 통해 얻어진 Roll, Pitch, Vertical방향의 모션구현을 위한 2중 플랫폼의 내부 6축의 길이변화를 역기구학을 통해 구한 뒤, 순기구학을 이용하여 실제 상판의 모션을 계측하였으며, 계측된 상판의 모션에 따른 외부 6축의 길이변화를 피드백 받아 오차를 추정할 수 있다. 일반적으로 순기구학에 관한 연구 방법은 크게 수치 해석적 방법, 기구해석적 방법, 추정기에 의한 방법이 있는데 본 논문에서는 Newton-Raphson 방법을 이용한 수치해석적 방법을 이용하여 해를 구하였다.

NOMENCLATURE

A	fixed frame
B	moving link frame
g_c	gravitational constant
h_i^A	angular momentum of limb i taken about point A_i
${}^i h_i^A$	h_i^A expressed in the i th limb frame
h_{ji}^C	angular momentum of link j of the i th limb taken about the center of mass of link j
I	identity matrix
I_i	inertia matrix of link i taken about the center of mass and expressed in a fixed frame A
J_p	Jacobian matrix of a moving platform
n_p	resulting moment exerted at the center of mass a moving platform
${}^B n_p$	n_p expressed in a moving frame B
p_x, p_y, p_z	$x, y,$ and z coordinates of $\boldsymbol{p}$
p_u, p_v, p_w	u, v and w coordinates of $\boldsymbol{p}$
${}^A P$	position vector of the center of mass of a moving platform with respect to a fixed frame A
${}^B P$	position vector of the center of a point $\boldsymbol{P}$ with respect to a fixed frame B
${}^A R_B$	3×3 rotation matrix that describes the orientation of frame B with respect to frame A
${}^B R_A$	inverse transformation of ${}^A R_B, {}^B R_A = {}^A R_B^{-1}$
r_{ci}	position vector of the center of mass of link i relative to the i th link frame, expressed in a fixed frame.

u_x, u_y, u_z	$x, y,$ and z components of **u**
u	unit vector pointing along the u-axis of a moving frame
v_x, v_y, v_z	$x, y,$ and z components of **v**
v	unit vector pointing along the v-axis of a moving frame
v_p	velocity of the center of mass of a moving platform relative to a fixed frame
$\dot{v}_p$	acceleration of the center of mass of a moving platform relative to a fixed frame
w_x, w_y, w_z	$x, y,$ and z components of **w**
w	unit vector pointing along the w-axis of a moving frame
x_i, y_i, x_i	$x, y,$ and z axis of the i th link frame
$\boldsymbol{w}_x, \boldsymbol{w}_y, \boldsymbol{w}_z$	$x, y,$ and z components of w_i
$\boldsymbol{w}$	angular velocity of a rigid body
$\boldsymbol{w}_P$	angular velocity of moving platform
$\dot{\boldsymbol{w}}_P$	angular acceleration of moving platform

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

1. 서 론

1.1 연구배경

시뮬레이터는 시간에 따라 변화되는 운동상태를 재현시킴으로써 조종수의 조종훈련이나 모사대상 운동체에 탑재되는 개발장비의 성능평가를 보다 안전하고 효과적으로 수행하기 위한 운동 모사장치이다. Stewart에 의해 비행기 시뮬레이터로 제안된 스튜어트 플랫폼은 평판 구조물의 플랫폼에 연결된 6개의 선형 구동 엑츄에이터에 의하여 플랫폼의 6 자유도 운동을 구현할 수 있는 시뮬레이터 이며, 작은 구동력의 엑츄에이터로 큰 부하를 구동시킬수 있는 병렬형 매니퓰레이터(parallel manipulator)의 대표적인 형태이다. 이 스튜어트 플랫폼은 폐루프(closed loop)의 형상을 가지고 있으므로 개루프(open loop의 형상을 지닌 직렬형 매니퓰레이터(serial manipulator)에 비해 구조적인 측면에서 보다 높은 강성도를 가져, 외부와의 접촉시 큰 접촉력이 발생하는 경우나 비교적 무거운 물체의 조작 등에 사용되어질 수 있다. 또한 여러 개의 링크가 연속적으로 연결되어 있는 직렬형 매니퓰레이터의 경우 조인트 각각에서의 오차가 단말 효과기(end effector)로 누적이 되는데 비하여, 이러한 병렬형 매니퓰레이터의 경우에는 오차가 누적되지 않으므로 정확도를 개선시킬 수 있는 장점도 가지고 있다. 이러한 특성을 가지고 있어 스튜어트 플랫폼은 주로 자동차, 항공기, 배, 및 포탑용 시뮬레이터에 많이 사용되고 있으며, 공작기계, 가상현실을 이용한 오락기 및 기타 시험장치 등으로 적용분야가 늘어나고 있다.

스튜어트 플랫폼에 대한 연구는 크게 동역학 해석, 제어, 최적설계, 기구학 해석 및 교정 분야로 나눌 수 있으며 지금까지의 연구결과는 다음과 같다. 스튜어트 플랫폼의 동역학 해석은

스튜어트 플랫폼의 구동력에 요구되는 힘 또는 토크를 구하는 것으로 실린더 설계뿐 아니라 플랫폼의 기하학적 형상 설계와 밀접한 관계가 있다. Fitcher는 나사이론을 이용한 순간속도 역기구학(instantaneous inverse kinematics) 및 동역학 모델을 제시하였으며, Sugimoto는 모터 대수(motor algebra)를 이용한 동역학 모델을 제시하였다. 그러나 이러한 모델은 구동기인 실린더를 고려하지 않은 모델이므로 구동기의 관성력에 의한 영향을 해석할 수 없는 단점이 있다. 이를 포함한 모델링에 대한 연구로는 Zhiming이 6개 구동기의 관성력을 고려하여 뉴턴 역학으로써 운동방정식을 유도한 바 있으며, 이것은 스튜어트 플랫폼의 운동에 각 구동기가 미치는 영향을 해석할 수 있는 모델로 사용할 수 있다. 스튜어트 플랫폼의 제어는 역기구학을 이용해 원하는 6 자유도 운동으로부터 구동기 길이의 명령 값을 계산하여 각각의 구동기 길이를 제어하는 링크 영역(linkspace)제어방법과 상판의 6 자유도 운동을 직접 제어하는 작업영역(workspace)제어방법이 연구되어 왔다. 그러나 전자의 경우 상판의 운동상태에 따라 달라지는 실린더의 부하를 고정된 부하로 가정하게 되므로 정밀제어가 어렵고, 후자의 경우 상판의 동역학적인 효과를 고려할 수 있는 장점을 가지고 있어 제어의 정밀도를 향상시킬 수 있으나 스튜어트 플랫폼의 기구학적 특성으로 닫힌 해가 구해지지 않는 순기구학 해석이 필요하다는 단점이 있다.

스튜어트 플랫폼의 최적설계에 관한 연구는 작업영역, 기구학적 특성인 기구학적 등방성(kinematic isotropy), 힘전달 특성, 그리고 동역학적 특성인 동역학적 등방성(dynamic isotropy) 및 최대소요 구동력 등을 고려한 설계 방법들이 발표된 바 있다. 기구학적 특성을 고려한 설계방법으로는 Aria 가 기구학적 등방성을 고려한

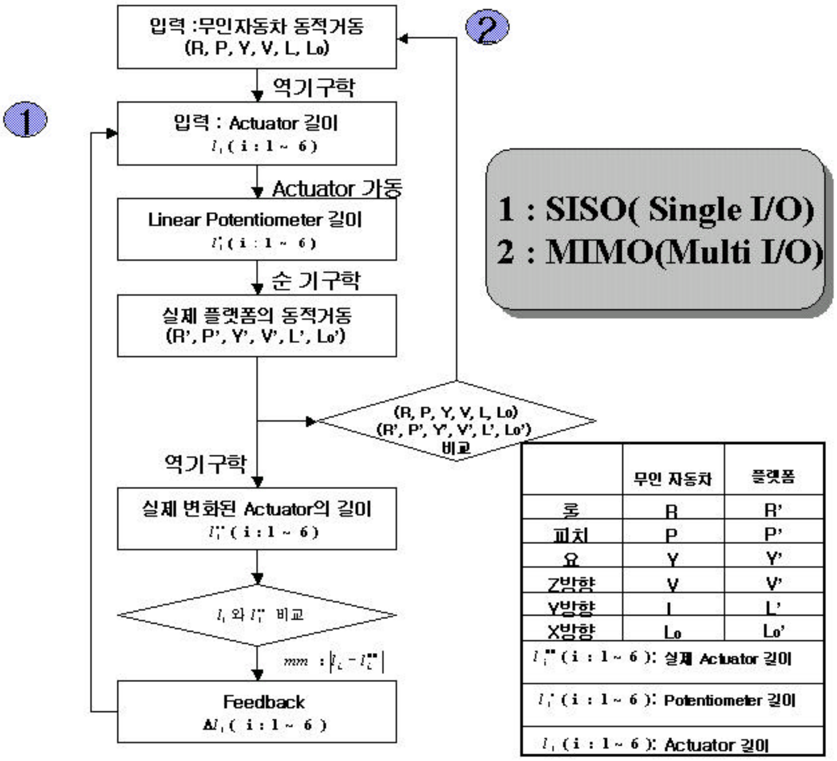
설계방안을, Kosuge와 안병준 등이 힘전달 특성을 고려한 설계방법을 제안하였으며, 동역학적 특성을 고려한 설계방안은 Ma와 Angeles 등이 동역학적 등방성을 고려한 설계방안을, Do와 Yang 그리고 권병희와 손권은 최대소요 구동력을 고려한 설계방안을 발표하였다. 이병주 등은 작업영역, 기구학적 특성 및 동역학적 특성을 모두 고려하여 설계변수를 최적화하는 연구를 수행하였다. 그러나 이들 연구에서 사용된 각종 설계 지수들은 작업 영역을 제외 하고는 모두 상판의 한 자세에서 성능을 나타내는 국부 성능지수(Local Performance Index)이고, 각각의 성능지수가 모두 동일한 결과를 제시하지는 않으므로 실제 설계 시에는 스튜어트 플랫폼의 사용 용도에 따라 적절한 성능지수를 대상으로 하여 설계하여야 한다.

직렬형 매니퓰레이터가 기구학 해석에 있어서 순기구학은 쉽게 해를 얻을 수 있으나 역기구학을 푸는 문제에 어려움이 있는 반면에, 병렬형 매니퓰레이터인 스튜어트 플랫폼의 역기구학은 간단한 벡터식으로 표현되어 쉽게 풀 수 있지만 순기구학 문제를 해결하기 위한 기존의 연구로서는 해석적인 방법, 수치해석적 방법, 기하학적인 접근방법, 추가적인 센서를 이용해서 해를 구하는 방법, 및 추정기 설계에 의해 해를 구하는 방법 등이 제안되어 왔다. 해석적인 방법으로는 Griffis와 Duffy, 그리고 Nanua 등은 스튜어트 플랫폼의 순기구학 해석에서 미지수를 제거하여 16차의 다항식으로 표현하였고, Raghavan 는 스튜어트 플랫폼이 40개의 순기구학의 해를 가짐을 보였다. Dieudonne과 Perrish 그리고 Nguyen 등은 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 알고리즘을 이용한 수치해석 방법을 사용하였다. Zhang과 Song, 그리고 Lee와 Roth는 순기구학 문제의 해가 닫힌 형태로 표현되어질 수 있도록 하는 상판과 하판의 기하학적 형상을 연구하였다. Cheok 등과 한길룡 등은 순기구학의

완전해를 추가적인 센서를 사용하여 구하였으며, 정규홍과 이교일, 강지윤 등과 이형상 등은 추정기 설계를 통하여 해를 구하는 방법을 발표하였다. 그러나 해석적인 방법은 해가 여러 개 존재하므로 선택의 문제가 남게 되고, 수치 해석적 방법은 수렴 여부 및 수렴속도가 초기 치에 의존하는 단점이 있으며, 기하학적인 방법은 특수한 구조형태를 갖는 경우에만 적용가능 하다. 추가적인 센서를 사용하는 경우에는 센서장착 문제 및 비용 문제가 있으며, 추정기 설계를 이용하는 방법 또한 플랫폼의 동적 특성이 충분히 고려되지 않으면 추종오차가 큰 단점이 있다. 스튜어트 플랫폼의 교정은 제작 혹은 설치과정에서 발생하는 조인트의 위치, 링크의 크기 등의 기구학적 인자(Kinematic Parameter)들의 오차를 보정하여 정확도를 개선하기 위한 작업이다. Wang은 스튜어트 플랫폼을 2R-P-3R의 구조를 갖는 6개의 직렬형 매니퓰레이터로 모델링 하여 직렬형 매니퓰레이터의 교정방법을 적용하였고, Zhuang과 Roth, 그리고 Driels와 Pathre는 효율적인 상판자세의 측정전략에 대한 연구를 수행하였다. Innocenti는 기구학적 인자들을 미지수로 하는 비선형 방정식을 유도하여 최적화 기법으로 그 해를 구하였고, Zhuang은 조인트에 추가적인 센서를 부착하여 상판자세의 측정 없이 스스로 교정할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 Wang의 방법은 시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있고, Innocenti의 방법은 여러 개의 임시 해가 구하여져 정확한 해를 다시 찾아야 하며, Zhuang의 방법은 추가적으로 설치되는 센서의 정확도 문제, 센서장착 및 비용의 문제가 있다.

1.2 연구내용 및 목적

본 논문은 차량 시뮬레이터에 의한 원격주행차량의 반력 장치인 차량 시뮬레이터의 정확한 운동 재현을 목적으로 스튜어트 플랫폼의 물리적 원리를 이해하고 매개 변수를 측정하여 보다 나은 측정치 데이터로 시뮬레이터를 제어하는 것이다. 주행차량의 데이터를 충실하게 모사하기위한 방법으로 스튜어트 플랫폼 속에 6개의 Linear Potentiometer를 상판과 하판에 고정시킨 2중 플랫폼 구조를 이용하여 축의 길이를 직접계측하지 않고 상판과 하판의 상대운동을 계측하여 수식적으로 기계적 유격을 포함한 상판과 하판의 축의 길이를 계측할 수 있다.

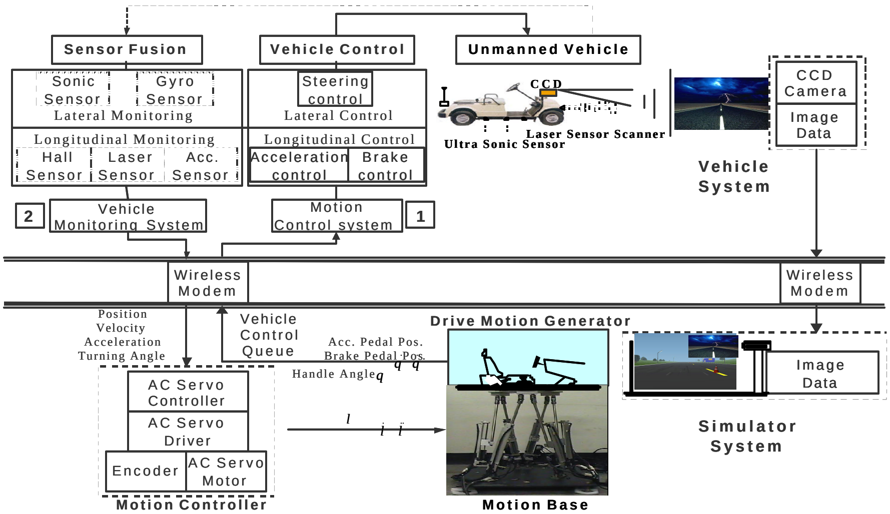


	무인 자동차	플랫폼
롤	R	R'
피치	P	P'
요	Y	Y'
Z방향	V	V'
Y방향	L	L'
X방향	Lo	Lo'
l_i'' (i : 1 ~ 6): 실제 Actuator 길이		
l_i' (i : 1 ~ 6): Potentiometer 길이		
l_i (i : 1 ~ 6): Actuator 길이		

[Fig. 1.1] 원격 무인주행 차량용 시뮬레이터 제어 흐름도

[Fig.1.1]은 무인 자동차에서 보내어지는 데이터인 Roll, Pitch, Yaw, Vertical, Lateral, Longitudinal 방향의 6자유도 모션이 원격 무인주행 차량용 시뮬레이터의 입력 데이터로서 스튜어트 플랫폼이 6자유도 모션을 구현 할 때 구동용 입력 신호 흐름도 이다. 차량용 모션구현을 위한 데이터는 1/2 Car 모델을 이용하여 범프(Bump) 통과시의 Roll, Pitch, Vertical 방향의 모션을 입력으로 하여 그 데이터를 스튜어트 플랫폼의 입력으로 하였다. 본 논문에서는 prototype의 플랫폼을 이용하여 축 하나에 대한 기계적 유격과 마찰 외의 모든 것을 포함한 AC Servo Motor를 블랙박스 모델링을 하였다. 비교 데이터로는 차량 모델링을 통해 얻어진 Roll, Pitch, Vertical방향의 모션 큐(Que)를 시뮬레이터에 입력하여 액츄에이터에 부착한 엔코더(Encoder) 값을 피드백(Feed Back)하여 구동하는 방법과 2중 플랫폼의 내부 6축의 길이변화를 역기구학을 통해 얻은 뒤에 순기구학을 이용하여 실제 상판의 모션을 계측하여 상판의 모션에 따른 외부 6축의 길이변화를 피드백하여 시뮬레이터를 구동하는 방법으로 하여 두 가지방법을 비교 자료로 하였다.

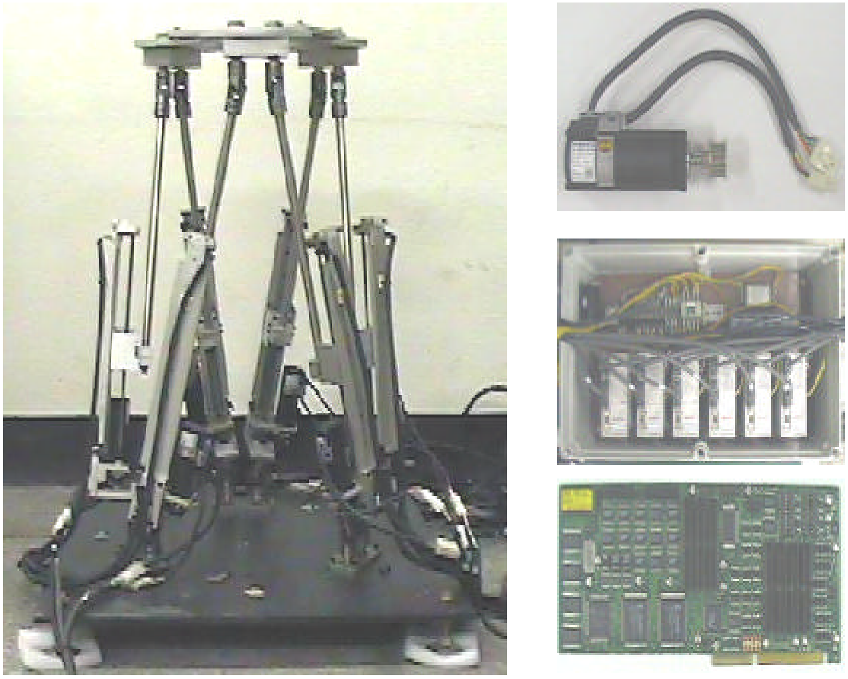
2. System Configuration



[Fig.2.1] 원격 무인주행 차량의 전체 개념도

먼저, 전체적인 시스템 개념 [Fig.2.1]은 차량 시뮬레이터 (Master System)와 무인차량(Slave System)으로 크게 두 가지 시스템으로 생각할 수 있다. Master System은 Slave System의 모션과 영상의 데이터와 원격 무인주행 차량의 핸들, 구동, 제동을 위한 장치들의 데이터를 무선 통신을 통하여 원격 무인주행 차량의 모션을 스튜어트 플랫폼인 반력장치로 구현하고 원격무인주행 차량의 핸들과 브레이크 장치를 반력장치로 운전자에게 전달하는 System이다. Slave System은 운전자가 원격 무인주행 차량의 전반적인 상태를 파악하고, 차량을 제어하기 위한 입력이 무선 통신을 통하여 원격 무인주행 받아서 새로운 입력에 따라서 무인으로 차량을 주행할 수 있게 하는 System 이다.

2.1 Master System



[Fig.2.2] 6축 스튜어트 플랫폼

[Fig.2.2]는 6-DOF를 가지는 스튜어트 플랫폼의 외형과 구동 System 으로서의 AC Servo system의 각 부분들을 나타내었다. 스튜어트 플랫폼은 차량 시뮬레이터의 모션 재현을 위한 Prototype으로 제작 되었다.

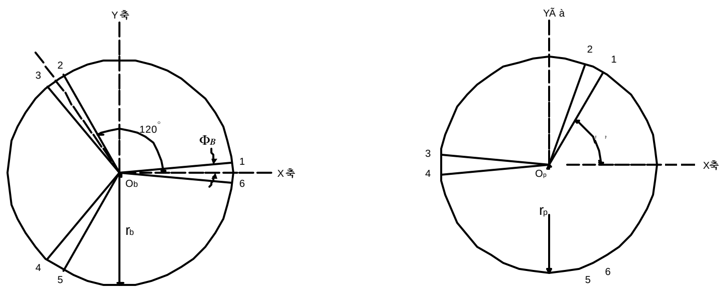
액츄에이터를 구동하여 제한적으로 3방향의 병진운동(Translation)과 회전운동(Rotation)을 표현하며, 원격주행차량의 모션을 모사하는 장치로서 스튜어트 플랫폼의 구동부는 삼성전자의 CSMZ-01BA1ANM3 단상 220V 정격출력 100W 용량의 AC Servo Motor모터를 장착하여 고속회전과 고 신뢰성을 실현 하였으며, Limit Sensor를 액츄에이터의 상하 끝 지점에 장착하여 동작을 제한하였다. 또한, 6개의 축을 동시 제어할 수 있는 삼성전자의 Multi-Motion Controller(MMC- BODPV81 Control Card)와 삼성전자의 CSDJ-01BX1 AC Servo Drive를 이용하여 스튜어트 플랫폼의

모션을 제어하였다.

Table 1 Stewart Platform Specification

Mass of Platform	5kg
Mass of Cylinder	1 kg
Mass of Piston	1 kg
Radius of Base	0.2125m
Radius of Platform	0.1625m
Height of Platform	0.706m
Mass of xx inertia of Platform	0.05127 $kg \cdot m^2$
Mass of yy inertia of Platform	0.05466 $kg \cdot m^2$
Mass of zz inertia of Platform	0.1046 $kg \cdot m^2$
Actuator Stroke	250mm(± 125mm)
Distance	Max : 948mm Min : 698mm

Table 1은 스튜어트 플랫폼의 사양(Spec.)을 나타내었으며 상판의 질량관성 모멘트(mass of inertia)는 CATIA V5를 이용하여 구할 수 있었다.



(a) Joint Coordinate of Base **(b) Joint Coordinate of Platform**

[Fig.2.3] 시스템 좌표계

[Fig.2.3]은 베이스와 운동플랫폼의 좌표계를 나타내었으며 다음의 Table 2는 각 자유도에 관한 운동범위 및 한계 속도에 관한 요구사항

이다. 본 요구사항에서 정의한 운동플랫폼의 운동 범위는 독립적으로 각각의 상황에 만족해야 하는 사항이다.

Table 2 Excursion Maximum Velocity

Function	Vertical	Lateral	Longitudinal
Displacement	±125mm	±125mm	±125mm
Velocity	300 mm/sec	300 mm/sec	300 mm/sec
Acceleration	±0.5g	±0.3g	±0.3g
Function	Roll	Pitch	Yaw
Displacement	±25 deg	±25 deg	±25 deg
Velocity	20 deg/sec	20 deg/sec	20 deg/sec
Acceleration	±60 deg/sec^2	±60 deg/sec^2	±60 deg/sec^2

Table 3 Minimum Working Space for continuous motion

Function	Vertical	Lateral	Longitudinal
Displacement	±2.25mm	±2.25mm	±2.25mm
Function	Roll	Pitch	Yaw
Displacement	±4 deg	±4 deg	±4 deg

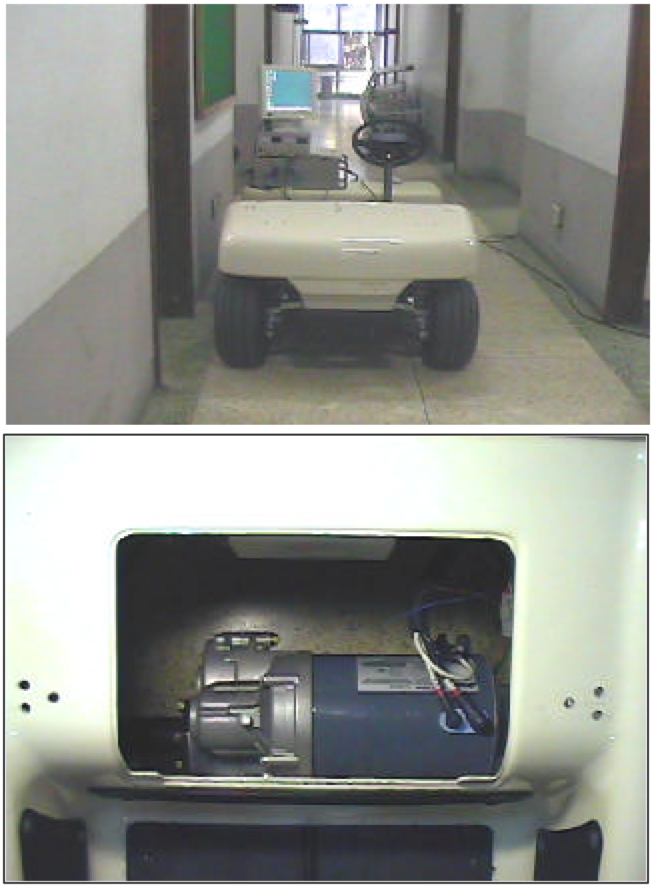
Table 4 최대변위, 속도 및 가속도 시험결과

구 분	Displacement	Velocity	Acceleration

Vertical	+120 mm -130 mm	85 mm/s	±0.39 g
Lateral	+320 mm -330 mm	195 mm/s	±0.42 g
Longitudinal	+325 mm -325 mm	195 mm/s	±0.42 g
Pitch	+47 deg -47 deg	32.5 deg/s	±240 deg/s^2
Roll	+45 deg -45 deg	32 deg/s	±240 deg/s^2
Yaw	+36 deg -36 deg	60 deg/s	±280 deg/s^2

Table 2는 MIL-STD-1588을 참조로 만들어진 차량 시뮬레이터의 성능 목표로써 각 자유도에 관한 운동 범위 및 한계속도와 가속도를 정의하며, Table 3은 본 연구에 사용된 차량 시뮬레이터의 운동영역 및 한계속도와 가속도를 나타내고 있다. Table 3에서 보듯이 Vertical 방향의 (+)방향이 요구성능에 미치지 못함을 알 수 있으며, 속도에서는 Vertical, Lateral, Longitudinal, Pitch, Roll 이 요구성능에 만족하지 못하였지만, 차량 시뮬레이터의 주요인자는 가속도 이므로 속도 성분은 실제 구동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

2.2 Slave System

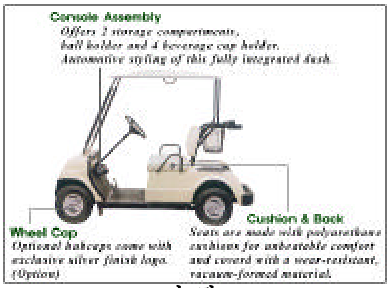


[Fig.2.4] 원격 무인주행 차량인 실험용 전기 자동차

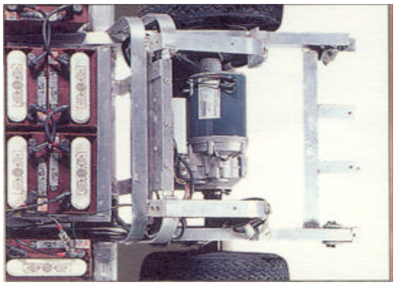
[Fig.2.4]는 Master System에서의 Control Signal을 수행하기 위한 무인차량(Slave System)이다. 무인차량(Slave System)은 크게 가속 시스템(Acceleration System), 정지 시스템(Brake System), 조향 시스템(Lateral System), 센서 시스템(Laser Sensor, Ultra Sonic Sensor)으로 나눌 수 있다. [Fig.2.4]의 전기자동차는 2.2[Kw], 3[Hp]의 48[V] DC모터가 장착된 전기자동차이다.

Table 5 Electric Vehicle Specification

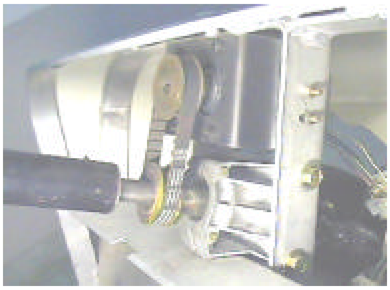
SPECIFICATION		
Overall Length		230cm
Overall Width		119.5cm
Overall Hight		124cm
Wheel Base		166.5cm
Wheel Tread	Front	92.5cm
	Rear	98.5cm
Dry Weight		250kg (Without Batteries)
Ground Clearance		10cm
Turning Radius		2.7m
Body		PMMA/ABS
Battery		48Voltage/8V, Output:48V,21Amp
Trans axle		Double Reduction Helical Gear
Suspension	Front	Tapered Leaf Spring & Hydraulic Shock Absorber
	Rear	Leaf Spring & Hydraulic Shock Absorber
Steering		Rack & Pinion Gear Box Type
Brake		Mechanical Brake Cable System to Drum Brake
Frame		All Aluminum Alloy Frame
Tire		18*8.5-8.0, 4ply-rating
Motor		Traction Shunt Re-gen Motor,2.2kw/3hp, DC48V-2800RPM



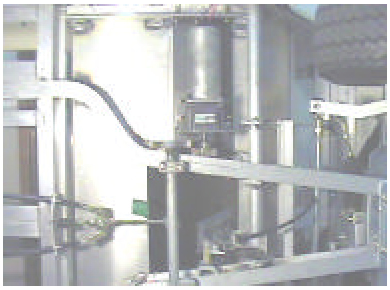
(a) 외 관



(b) Acceleration Control Part



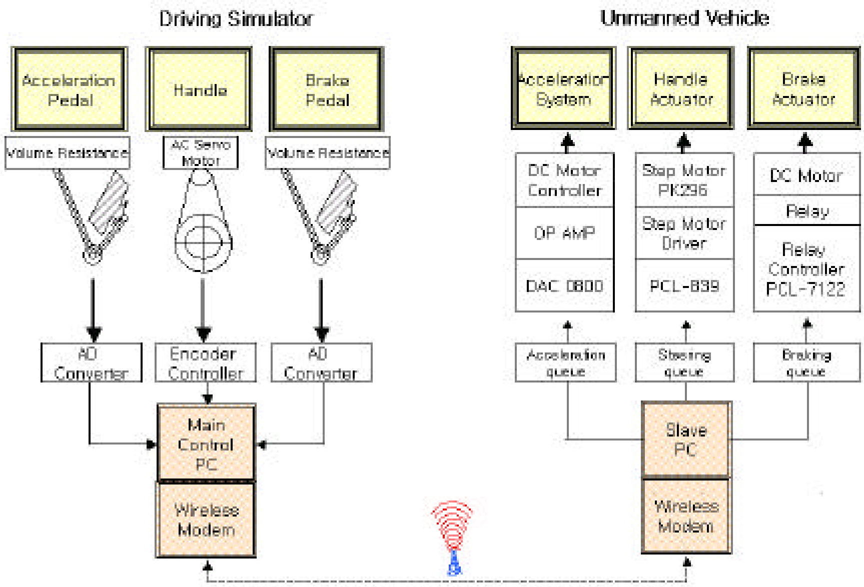
(c) Handle Control Part



(d) Brake Control Part

[Fig.2.5] 무인 자동차의 외관과 각 제어시스템

[Fig.2.5]의 원격 주행차량 시스템의 Acceleration System, Handle System, Brake System 각각의 시스템과 Master System과의 제어흐름 구상도는 Appendix로 추가한다.



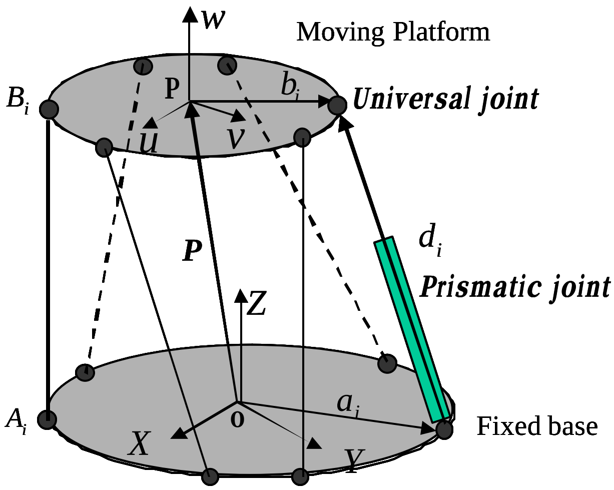
[Fig.2.6] 원격 무인주행 차량 제어 신호 블록 다이아그램

[Fig.2.6]은 Master System에서 운전자가 원격 주행차량의 상태를 인식하고 원격주행차량의 Lateral, Longitudinal방향을 제어하기 위하여 Acceleration Pedal, Handle, Brake Pedal을 운전하고 Acceleration Pedal, Handle, Brake Pedal의 값을 원격 무인주행 차량에 무선 통신으로 보내어지고, 각각의 Acceleration System, Handle System, Brake System들을 제어한다.

3. Kinematics Analysis of Stewart Platform

3.1 Inverse Kinematics

본 논문에서 대상으로 하는 플랜트는 아래의 [Fig.3.1]과 같이 하부 베이스(Fixed base), 다리(Axis), 상부 플랫폼(Moving Platform)으로 구성되어 있고, 각각 유니버셜(universal)조인트와 병진(prismatic)조인트로 연결되어 있으며, $i=1,\ldots,6$는 각각 상판과 하판에서의 구동기가 연결된 조인트 위치를 나타낸다.



[Fig.3.1] The Coordinate of Stewart Platform

역기구학(inverse kinematics) 문제 해석은 부하의 위치와 방향으로부터 실린더의 길이를 결정하는 문제이다. 이는 상판이 특정한 운동을 하기 위해서 각 실린더에 어떠한 입력을 가하여야 하는가를 계산하는 경우에 사용되어 진다. 위 그림에서와 같이 실린더 길이 d_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = \sqrt{(d_{ix}^2 + d_{iy}^2 + d_{iz}^2)} \tag{1}$$

또한, 변환행렬 특성으로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$
\begin{aligned}
&u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 = 1, \\
&v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 = 1, \\
&w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 = 1, \\
&u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0, \\
&u_x w_x + u_y w_y + u_z w_z = 0, \\
&v_x w_x + v_y w_y + v_z w_z = 0,
\end{aligned} \tag{2}
$$

식 (1)에 식(2)를 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$d_i^2 = p^T p + [{}^B b_i]^T [{}^B b_i] + a_i^T a_i + 2 p^T [{}^A R_B {}^B b_i] - 2 p^T a_i - 2[{}^A R_B {}^B b_i]^T a_i \tag{3}$$

여기서 $i = 1,2,3,4,5,6$ 이다. 식 (3)은 관성좌표계에 대한 d_i 를 구하는 폐쇄형 해를 나타낸다.

3.2 Forward Kinematics

3.2.1 Forward Kinematics Analysis

순기구학(Forward kinematics) 문제는 6개의 실린더의 길이가 주어졌을 때 병렬형 매니퓰레이터의 운동을 기술하는 것으로, 상판의 병진운동과 회전운동을 결정하는 문제로 설명되어 진다. 병렬형 매니퓰레이터에서 역기구학 해석은 비교적 간단하고 쉽게 해를 구할 수 있지만, 순기구학 해석은 매우 난해한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 비선형 연립방정식을 풀이하는 문제이므로 해가 쉽게 구해지지 않는다. 그래서, 이 비선형 연립방정식을 수치 해석적으로 풀이하는 방법이 도입되었다. 즉, 순기구학 문제를 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법을 비롯한 여러 가지 수치해석 알고리즘을 이용하여 풀이하는 것이다. 이외에도 여분의 센서를 이용하여 작동기의 길이 이외의 정보를 순기구학의 문제를 풀 때 이용하는 방법, 확장 칼만필터를 이용한 순기구학 추정기를 설계함으로써 순기구학을 해석하는 방법 등이 있다.

3.2.2 Newton-Raphson Method

일반적으로 순기구학 문제는 6개의 고차 비선형 연립방정식이기 때문에 폐쇄형 해가 존재하지 않는다. 따라서, 위의 비선형 방정식을 풀기 위해서는 반복 수치 해석법을 사용하여야 한다. 이 절에서는 뉴턴-랩슨 방법을 이용한 순기구학 해석에 대해서 기술한다. 뉴턴-랩슨 방법을 사용하기 위해서 다음과 같은 스칼라 함수를 정의한다.

$$f_i(a) = d_{ix}^2 + d_{iy}^2 + d_{iz}^2 - d_i^2 = 0 \qquad (4)$$

여기서 벡터 a는 다음과 같이 정의한다.

$$a = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6]^T = [T_x \quad T_y \quad T_z \quad \boldsymbol{a} \quad \boldsymbol{b} \quad \boldsymbol{g}]^T$$

벡터 a를 구하기 위해서 다음의 알고리즘을 적용한다.

[단계1] 초기값 a를 선정한다.

[단계2] 변환행렬을 구한다.

[단계3] $d_i\,([d_{ix} \quad d_{iy} \quad d_{iz}]^T)$를 구한다.

[단계4] $f_i(a)$와 $A_{ij} = \dfrac{\partial f_i}{\partial a_j}$를 계산한다.

[단계5] $C_i = -f_i(a)$를 계산한다.

만일, $\sum_{j=1}^{6} |C_j| <$ 허용오차 이면 중단하고 a를 해로 선정하고, 아닌 경우에는 단계[6]을 수행한다.

[단계6] 삼각행렬 분해법을 사용하여 da_j에 대하여 $\sum A_{ij}da_j = C_i$ 를 푼다. 만일 $\sum_{j=1}^{6}\left|da_j\right|$ <허용오차 이면 중단하고 a를 해로 선정하고, 아닌 경우는 [단계7]을 수행한다.

[단계7] $a^{new} = a + d$ 를 선택하고 [단계1]에서 [단계7]까지를 반복한다.

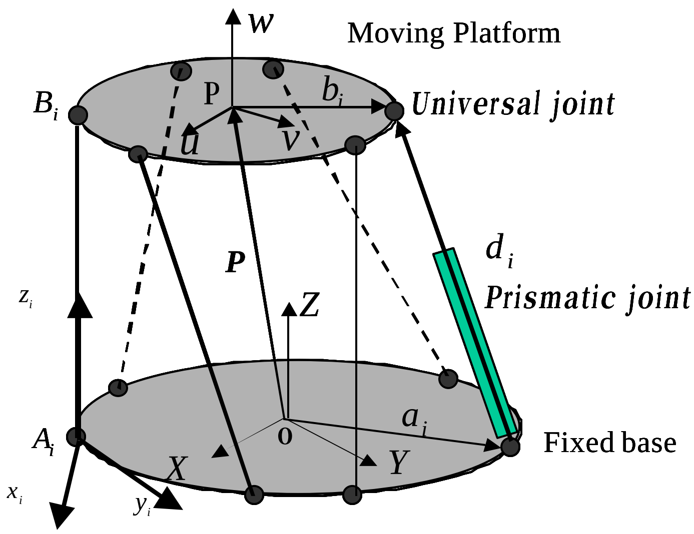
3.3 Dynamics Analysis

3.3.1 Newton-Euler Formulation

동역학 해석(Dynamics analysis)은 크게 다리관성을 고려한 모델과 그렇지 않은 모델로 나누어 볼 수 있다. 다리 관성을 무시한 경우는 고려한 경우에 비해 상대적으로 간단한 식으로 표현된다. 그러나 이러한 모델은 다리의 관성력에 의한 효과를 해석할 수 없는 단점을 가지며 Fichter, Sugimoto 등이 연구한 바 있다. 다리관성을 고려한 모델에 관한 연구는 Zhiming 이 뉴톤 역학으로 운동방정식을 유도한 바 있으며 Lee, Lebret 는 라그랑지(Lagrangian) 방법을 이용하여 모델링을 수행하였다. 이러한 모델링은 다리 관성력의 영향이나 다리에 걸리는 횡방향 부하에 대해 해석할 수 있지만, 복잡한 기구학식을 포함하므로 실제 운동 시 다리영향이 크지 않은 경우에는 제어기 설계의 동적 모델로는 적합하지 않다. 일반적으로 운동재현기와 같이 부하의 관성이 상대적으로 큰 경우는 다리관성 효과를 무시할 수 있다. 그러나 부하의 관성이 작거나 상대적으로 다리의 관성이 큰 경우는 플랫폼과 다리의 관성을 동시에 고려한 동역학 모델이 필요하다. 특히 본 연구에 사용된 스튜어트

플랫폼과 같이 부하 대 무게비가 큰 전기모터로 다리를 구성한 경우가 그러하다. 본 논문에서는 일반적인 뉴턴-오일러(Newton-Euler)방법을 사용하여 스튜어트 플랫폼의 동역학을 유도하였다.

3.3.2 Dynamics analysis of Stewart Platform



[Fig.3.2] The Coordinate of Stewart Platform Dynamics

앞의 [Fig.3.2]에서 본 바와 같이 스튜어트 플랫폼의 하판에 고정된 좌표계 $A(x,y,z)$와 상판에 고정된 또 다른 좌표계 $B(u,v,w)$를 가지고 있으며, $x-y$ 평면상에 하판의 조인트인 $A_i(i=1 \quad to \quad 6)$과 $u-v$ 평면상에 상판의 조인트 $B_i(i=1 \quad to \quad 6)$가 위치해 있다. 각각 상판과 하판의 조인트를 연결한 6개의 축을 나타내는 벡터를 d_i로 나타내고, 이때 하판의 조인트 A_i를 원점으로 하는 6개의 축에 대한 좌표계를 $C(x_i,y_i,z_i)$로 나타낸다. 여기서 z_i축은 하판의 조인트 A_i로부터 상판의 조인트 B_i로의 방향으로 정의 하였으며, y_i 축은 z_i축과 z축 각각의 단위벡터의 외적의 방향과

평행하다. 스튜어트 플랫폼의 역동역학 해석(Inverse Dynamics Analysis)은 원하는 Motion Trajectory(상판의 위치, 속도, 가속도)가 주어졌을 때 스튜어트 플랫폼의 구동에 요구되는 힘 또는 토크를 구하는 것으로, 상판의 Motion Trajectory는 하판의 중심에서 상판의 중심까지를 나타내는 위치 벡터인 P 와 세 개의 오일러 각$(f,\ q,\ y)$로 표현할 수 있다. 상판의 중심점인 P 점의 속도와 가속도는 위치벡터 P 을 시간에 대해 미분 함으로써 얻을 수 있으며 각각 $v_p = \dot{p}$ 와 $\dot{v}_p = \ddot{p}$ 로 나타낼 수 있다. 또한 오일러 각 f는 z축으로의 회전을 나타내고, 두번째 회전각 q는 v축으로의 회전을 나타내며, 세번째 회전각 y는 u축으로의 회전을 나타낸다. 상판의 고정된 하판에 대한 회전행렬(rotation matrix)은 다음과 같다.

$$
{}^{A}R_{B} = \begin{bmatrix} cfcq & -sfcy + cfsqsy & sfsy + cfsqcy \\ sfcq & cfcy + sfsqsy & -cfsy + sfsqcy \\ -sq & cqsy & cqcy \end{bmatrix} \tag{1}
$$

상판의 각속도(angular velocity) w_p는 스튜어트 플랫폼에 고정된 좌표계의 각각의 단위 벡터와 오일러 각에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$
w_p = \dot{f}w + \dot{q}v' + \dot{y}u'' \tag{2}
$$

위의 식(2)에서 $w,\ v',\ u''$는 서로 수직하지 않으며 고정된 하판의 좌표계에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$
w_p = \begin{bmatrix} \dot{y}sfsy + \dot{y}cfsqcy - \dot{q}sf \\ -\dot{y}cfsy + \dot{y}sfsqcy + \dot{q}cf \\ \dot{y}cqcy + \dot{f} \end{bmatrix} \tag{3}
$$

상판의 각 가속도(angular acceleration)은 식 (3)으로부터 얻을 수 있다.

$$\dot{w}_p = \begin{bmatrix} \ddot{y}\, sfsy + \dot{y}\,\dot{f}\, cfsy + \dot{y}^2\, sfcy + \ddot{y}\, cfsqcy - \dot{y}\,\dot{f}\, sfsqcy \\ +\dot{q}\,\dot{y}\, cfcqcy - y^2 cfsqsy - \ddot{q}\, sf - \dot{q}\, cf \\ -\ddot{y}\, cfsy + \dot{y}\,\dot{f}\, sfsy - y^2 cfcy + \ddot{y}\, sfsqcy + \dot{y}\,\dot{f}\, cfsqcy \\ +\dot{y}\,\dot{q}\, sfcqcy - y^2 sfsqsy + \ddot{q}\, cf - \dot{q}\,\dot{f}\, sf \\ \ddot{y}\, cqcy - \dot{y}\,\dot{q}\, sqcy - \dot{y}^2\, cqsy + \ddot{f} + \dot{f} \\ \end{bmatrix} \tag{4}$$

위에서 나타낸 w_p와 $\dot{w}_p$는 하판의 좌표계 A에 대한 표현이므로, 상판의 좌표계에 대해 표현하기 위해서는 ${}^{A}R_{B}^{T}$를 이용하여 구한다.

(a) Position Analysis

앞의 그림에서 보면 다음과 같은 벡터루프방정식을 얻을 수 있다.

$$a_i + d_i\, s_i = p + b_i \tag{5}$$

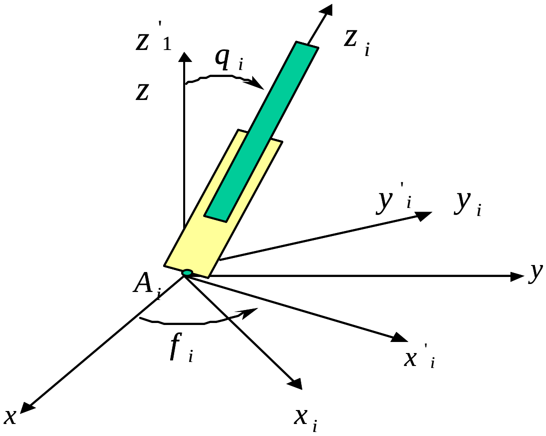
여기서 a_i는 하판의 중심으로부터 각 조인트까지의 위치벡터를 나타내며, b_i는 상판의 중심으로부터 각 조인트까지의 위치벡터를 상판의 좌표계에 대하여 나타낸 벡터가 된다. 또한 s_i는 하판의 조인트 A_i에서 상판의 조인트 B_i까지를 나타내는 벡터의 단위벡터이며, d_i는 각 엑츄에이터의 길이를 나타낸다. 위의 식 (5)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$s_i = \frac{p + b_i - a_i}{d_i} \tag{6}$$

$$d_i = \left| p + b_i - a_i \right| \tag{7}$$

하판에 고정된 실린더의 끝단은 Universal Joint로 구성이 되어있으므로, 각각의 엑츄에이터의 회전운동은 하판의 좌표계로부터 두개의 오일러각으로 표현할 수 있다. 다음 그림과 같이 처음 z_i축을 중심으로 f_i만큼

회전한 뒤 $y_i^{'}$ 을 중심으로 q_i 만큼 회전했을 때 기준 좌표계에 대한 엑츄에이터의 회전행렬(rotation matrix)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



[Fig.3.3] Euler Angles of Limb

$$ {}^{A}R_i = \begin{bmatrix} cf_i cq_i & -sf_i & cf_i sq_i \\ sf_i cq_i & cf_i & sf_i sq_i \\ -sq_i & 0 & cq_i \end{bmatrix} \tag{8} $$

단위벡터 s_i 는 i 번째 엑츄에이터 좌표계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ {}^{i}s_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9} $$

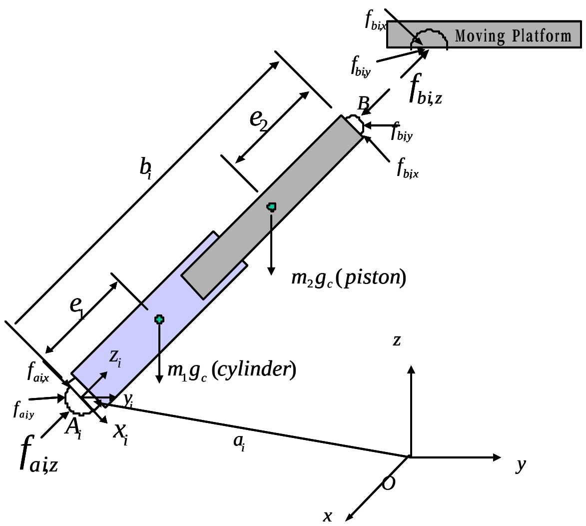
위의 식 (8),(9)를 이용하여 기준 좌표계로부터 단위벡터 s_i 를 다음과 구할 수 있다.

$$s_i = \begin{bmatrix} c f_i s q_i \\ s f_i s q_i \\ c q_i \end{bmatrix} \qquad (10)$$

위의 식(10)으로부터 엑츄에이터의 하판의 좌표계에 대한 오일러각 q_i, f_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} cq_i &= s_{iz} \\ sq_i &= \sqrt{(s_{ix}^2 + s_{iy}^2} \qquad (0 \le q \le p) \\ sf_i &= s_{iy} / sq_i \\ cf_i &= s_{ix} / sq_i \end{aligned} \qquad (11)$$

이상의 식(6)~(10)을 이용하여 상판의 운동에 따른 엑츄에이터의 고정된 하판의 좌표계에 대한 방향(direction)과 오일러각(Euler angles)을 알 수 있다. 다음의 [Fig.3.4]에서 보듯이 각 엑츄에이터는 하판에 한쪽 끝이 고정된 실린더(Cylinder)와 상판에 한쪽 끝이 고정된(Piston)으로 구성되어 있다.



[Fig.3.4] Free Body Diagram of a Typical Limb

여기서, 하판의 원점에서부터 실린더와 피스톤 각각의 무게중심 까지의

위치벡터은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{1i} = a_i + e_1 s_i \tag{12}$$

$$r_{2i} = a_i + (d_i - e_2) s_i \tag{13}$$

(b) 엑츄에이터의 Velocity Analysis

상판의 선속도(linear velocity)와 각속도(angular velocity)에 의하여 엑츄에이터의 선속도와 각속도를 구할 수 있다.

상판의 조인트 끝단 B_i 에서의 속도를 v_{bi} 라면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{bi} = v_p + w_p \times b_i \tag{14}$$

이를 i번째 엑츄에이터 좌표계에 대해 나타내면

$$^i v_{bi} = {}^i R_A v_{bi} \tag{15}$$

$$^i v_{bi} = d_i \, {}^i w_i \times {}^i s_i + \dot{d}_i \, {}^i s_i \tag{16}$$

과 같이 나타내며, 각 엑츄에이터의 선속도(linear velocity)와 각속도(angular velocity)는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{d}_i = {}^i v_{biz} \tag{17}$$

$$^i w_i = \frac{1}{d_i} ({}^i s_i \times {}^i v_{bi}) = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} -{}^i v_{biy} \\ {}^i v_{bix} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{18}$$

또한, i 번째 실린더(cylinder)와 피스톤(piston)의 무게 중심의 속도 $^i v_{1i}$, $^i v_{2i}$ 는 식(12)와 식(13)의 미분항으로써 다음과 같이 표현된다.

$$ {}^{i}v_{1i} = e_1 {}^{i}w_i \times {}^{i}s_i = \frac{e_1}{d_i} \begin{bmatrix} {}^{i}v_{bix} \\ {}^{i}v_{biy} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{19} $$

$$ {}^{i}v_{2i} = (d_i - e_2)\, {}^{i}w_i \times {}^{i}s_i + \dot{d}_i\, {}^{i}s_i = \frac{1}{d_i} \begin{bmatrix} (d_i - e_2){}^{i}v_{bix} \\ (d_i - e_2){}^{i}v_{biy} \\ d_i\, {}^{i}v_{biz} \end{bmatrix} \tag{20} $$

(C) 엑츄에이터의 Acceleration Analysis

위의 식 (14)를 이용하여 상판의 볼조인트 끝단 B_i의 하판의 좌표계에 대한 가속도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ \dot{v}_{bi} = \dot{v}_p + \dot{w}_p \times b_i + w_p \times (w_p \times b_i) \tag{21} $$

식(16)을 이용하여 i 번째 엑츄에이터의 좌표계에 대한 상판 조인트 끝단 B_i의 가속도는 다음과 같은 i 번째 엑츄에이터의 각가속도 형식으로 표현할 수 있다.

$$ {}^{i}\dot{v}_{bi} = \ddot{d}_i\, {}^{i}s_i + d_i\, {}^{i}\dot{w}_i \times {}^{i}s_i + d_i\, {}^{i}w_i \times ({}^{i}w_i \times {}^{i}s_i) + 2\dot{d}_i\, {}^{i}w_i \times {}^{i}s_i \tag{22} $$

식(22)으로부터 엑츄에이터의 축 방향으로의 가속도를 다음과 같이 구하며,

$$ \ddot{d}_i = {}^{i}\dot{v}_{biz} + d_i\, {}^{i}w_i^2 = {}^{i}\dot{v}_{biz} + \frac{{}^{i}v_{bix}^2 + {}^{i}v_{biy}^2}{d_i} \tag{23} $$

각 가속도(angular acceleration)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$
{}^{i}\dot{w}_i = \frac{1}{d_i}\,{}^{i}s_i \times {}^{i}\dot{v}_{bi} - \frac{2\dot{d}_i}{d_i}\,{}^{i}w_i = \frac{1}{d_i}\begin{bmatrix} -{}^{i}\dot{v}_{biy} + \dfrac{2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{biy}}{d_i} \\ {}^{i}\dot{v}_{bix} - \dfrac{2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{bix}}{d_i} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{24}
$$

또한, 식(19),(20)으로부터 i번째 실린더와 피스톤의 무게중심으로부터의 가속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$
{}^{i}\dot{v}_{1i} = e_1\,{}^{i}\dot{w}_i \times {}^{i}s_i + e_1\,{}^{i}w_i \times ({}^{i}w_i \times {}^{i}s_i) = \frac{e_i}{d_i}\begin{bmatrix} {}^{i}\dot{v}_{bix} - \dfrac{2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{bix}}{d_i} \\ {}^{i}\dot{v}_{biy} - \dfrac{2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{biy}}{d_i} \\ -\dfrac{{}^{i}v_{bix}^2 + {}^{i}v_{biy}^2}{d_i} \end{bmatrix} \tag{25}
$$

$$
{}^{i}\dot{v}_{2i} = \ddot{d}_i\,{}^{i}s_i + (d_i - e_2)\,{}^{i}\dot{w}_i \times {}^{i}s_i + (d_i - e_2)\,{}^{i}w_i \times ({}^{i}w_i \times {}^{i}s_i) + 2\dot{d}_i\,{}^{i}w_i \times {}^{i}s_i
$$

$$
= \frac{1}{d_i}\begin{bmatrix} (d_i - e_2)\,{}^{i}v_{bix} + \dfrac{2\dot{e}_2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{bix}}{d_i} \\ (d_i - e_2)\,{}^{i}v_{biy} + \dfrac{2\dot{e}_2\,{}^{i}v_{biz}\,{}^{i}v_{bix}}{d_i} \\ d_i\,{}^{i}\dot{v}_{biz} + \dfrac{e_2({}^{i}v_{bix}^2 + {}^{i}v_{biy}^2)}{d_i} \end{bmatrix} \tag{26}
$$

3.3.3 Dynamics of the Limbs

스튜어트 플랫폼의 동역학 해석을 위해서 모션을 구현하는 상판과 6개의 엑츄에이터를 Subsystem으로 구분하여 각각에 대하여 동역학 해석을 하였다. 엑츄에이터의 자유물체도는 앞의 [Fig.3.4]와 같이 나타내 었으며, 실린더와 피스톤 각각의 영향을 고려한 동역학 방정식을 이용하였다. Euler 방정식을 이용하여 하판의 i번째 조인트 끝단 A_i에서 나타나는 합 모멘트(resultant moment)와 같은 지점에서의 실린더와 피스톤에 의한 각 운동량(angular momentum)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ {}^i n_i^A = \frac{d}{dt}({}^i h_i^A) \tag{27}$$

여기서 각 운동량(angular momentum)은 다음과 같으며

$$ {}^i h_i^A = m_1 e_1({}^i s_i \times {}^i v_{1i}) + m_2(d_i - e_2)({}^i s_i \times {}^i v_{2i}) + {}^i h_{1i}^C + {}^i h_{2i}^C \tag{28}$$

여기서 ${}^i h_{1i}^C = {}^i I_{1i}\,{}^i w_i$, ${}^i h_{2i}^C = {}^i I_{2i}\,{}^i w_i$ 는 실린더와 피스톤의 각 운동량 이다. 또한 ${}^i I_{1i}$ 과 ${}^i I_{2i}$ 는 실린더와 피스톤 각각의 무게중심에서의 관성행렬 (inertia matrix)이다. 실린더와 피스톤 각 운동량의 미분항인 식(29)의 우변은 다음과 같이 나타낸다.

$$ \frac{d}{dt}({}^i h_i^A) = m_1 e_1({}^i s_i \times {}^i \dot{v}_{1i}) + m_2(d_2 - e_2)({}^i s_i \times {}^i \dot{v}_{2i}) + {}^i I_{1i}\,{}^i \dot{w}_i \tag{29}$$
$$ + {}^i w_i \times ({}^i I_{1i}\,{}^i w_i) + {}^i I_{2i}\,{}^i \dot{w}_i + {}^i I_{2i}\,{}^i \dot{w}_i + {}^i w_i \times ({}^i I_{2i}\,{}^i w_i) $$

각 엑츄에이터의 i번째 조인트 끝단에 미치는 모멘트 (moment)는 피스톤과 실린더의 무게중심에서의 중력과 상판의 끝단 B_i에서 발생하는 반력(reaction force)에 의해 발생한다. 그러므로 하판의 조인트 끝단 A_i에 미치는 모멘트(moment)는 피스톤과 실린더의 무게중심에서의 중력과 상판의 끝단 B_i 에서 발생하는 반력(reaction force)에 의해 발생하며 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
{}^i n_i^A &= d_i\,{}^i s_i \times (-{}^i f_{bi}) + [m_1 e_1 + m_2 (d_i - e_2)]({}^i s_i \times {}^i R_A\,{}^A g) \\
&= \begin{bmatrix} d_i\,{}^i f_{biy} \\ -d_i\,{}^i f_{bix} + m_1 e_1 g_c s\theta_i + m_2 (d_i - e_2) g_c s\theta_i \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{30}
$$

위의 식 (30)과 (31)을 식 (28)에 대입하여 i번째 Limb frame에 대한 각 방향의 반력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
{}^i f_{bix} = \frac{1}{d_i} [& m_1 e_1 g_c s\theta_i + m_2 (d_i - e_2) g_c s\theta_i - m_1 e_1\,{}^i\dot{v}_{1ix} \\
& - m_2 (d_i - e_2)\,{}^i\dot{v}_{2ix} - I_{1iy}\,{}^i\dot{w}_{iy} - I_{2iy}\,{}^i\dot{w}]
\end{aligned}
\tag{31}
$$

$$
{}^i f_{biy} = \frac{1}{d_i} [-m_1 e_1\,{}^i\dot{v}_{1iy} - m_2 (d_i - e_2)\,{}^i\dot{v}_{2iy} + I_{1ix}\,{}^i\dot{w}_{ix} + I_{2ix}\,{}^i\dot{w}_{ix}] \tag{32}
$$

여기서 I_{jix}와 I_{jiy} 는 실린더 (j=1)와 피스톤(j=2)의 무게중심 에서의 주관성모멘트(principal)를 나타낸다.

3.3.4 Dynamic of the Moving Platform

고정된 관성 좌표계(inertial frame)에 대하여 표현되는 상판의 움직임은 Newton's equation에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$
\sum_{i=1}^{6} {}^A f_{bi} + m_p\,{}^A g = m_p\,{}^A\dot{v}_p \tag{33}
$$

식 (34)를 x,y,z 성분으로 나누면 다음과 같다.

$$
\sum_{i=1}^{6} ({}^i f_{bix} c\phi_i c\theta_i - {}^i f_{biy} s\phi_i + {}^i f_{biz} c\phi_i s\theta_i) = m_p\,\dot{v}_{px} \tag{34}
$$

$$
\sum_{i=1}^{6} ({}^i f_{bix} s\phi_i c\theta_i + {}^i f_{biy} c\phi_i + {}^i f_{biz} s\phi_i s\theta_i) = m_p\,\dot{v}_{py} \tag{35}
$$

$$
\sum_{i=1}^{6} (-{}^i f_{bix} s\phi_i + {}^i f_{biz} c\theta_i) = m_p\,\dot{v}_{pz} + m_p g_c \tag{36}
$$

또한, 상판의 운동좌표계 B 로부터 표현되어 지는 상판무게 중심(Cener of Mass)의 합 모멘트(Resulting Moment)는 Euler-equation을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ {}^{B}n_{p} = \sum_{i=1}^{6} {}^{B}b_{i} \times {}^{B}f_{bi} \tag{37} $$

$$ \sum_{i=1}^{6} b_{iv}(a_{31}{}^{i}f_{bix} + a_{32}{}^{i}f_{biy} + a_{33}{}^{i}f_{biz}) = I_{pu}\dot{w}_{pu} - w_{pv}w_{pw}(I_{pv} - I_{pw}) \tag{38} $$

$$ \sum_{i=1}^{6} -b_{iu}(a_{31}{}^{i}f_{bix} + a_{32}{}^{i}f_{biy} + a_{33}{}^{i}f_{biz}) = I_{pv}\dot{w}_{pv} - w_{pw}w_{pu}(I_{pw} - I_{pu}) \tag{39} $$

$$ \sum_{i=1}^{6} [b_{iu}(a_{21}{}^{i}f_{bix} + a_{22}{}^{i}f_{biy} + a_{23}{}^{i}f_{biz}) - b_{iv}(a_{11}{}^{i}f_{bix} + a_{12}{}^{i}f_{biy} + a_{13}{}^{i}f_{biz})] = I_{pw}\dot{w}_{pw} \tag{40} $$

식 (38)~(40) 에서 a_{ij} 는 상판의 물체 좌표계와 limb 좌표계와의 회전변환 행렬 ${}^{B}R_{i}$ 의 (i, j) 요소를 말하며, ${}^{B}w_{p} = [w_{pu}, w_{pv}, w_{pw}]^{T}$ 는 상판의 물체좌표계에 대해 나타낸 상판의 각속도(angular velocity)를 나타낸다. 또한 I_{pu}, I_{pv}, I_{pw} 는 상판의 무게중심에서의 u, v, w 방향으로의 주관성모멘트(the principal moment of inertia)를 나타낸다. 이상의 식(35)~(41)을 이용하여 다음의 행렬식을 만들 수 있다.

$$ \begin{bmatrix} {}^{A}s_{1x} & {}^{A}s_{2x} & \cdots & {}^{A}s_{6x} \\ {}^{A}s_{1y} & {}^{A}s_{2y} & \cdots & {}^{A}s_{6y} \\ {}^{A}s_{1z} & {}^{A}s_{2z} & \cdots & {}^{A}s_{6z} \\ {}^{B}M_{1x} & {}^{B}M_{2x} & \cdots & {}^{B}M_{6x} \\ {}^{B}M_{1y} & {}^{B}M_{2y} & \cdots & {}^{B}M_{6y} \\ {}^{B}M_{1z} & {}^{B}M_{2z} & \cdots & {}^{B}M_{6z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{i}f_{b1z} \\ {}^{i}f_{b2z} \\ {}^{i}f_{b3z} \\ {}^{i}f_{b4z} \\ {}^{i}f_{b5z} \\ {}^{i}f_{b6z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m({}^{A}a_{x} - {}^{A}g_{x}) - {}^{A}F_{Ex} \\ m({}^{A}a - {}^{A}g_{y}) - {}^{A}F_{Ey} \\ m({}^{A}a - {}^{A}g_{z}) - {}^{A}F_{Ez} \\ {}^{B}H_{x} - {}^{B}T_{Ex} \\ {}^{B}H_{y} - {}^{B}T_{Ey} \\ {}^{B}H_{Z} - {}^{B}T_{Ez} \end{bmatrix} \tag{41} $$

여기서, ${}^{A}F_{E}$ 는 외력을 나타내며, ${}^{B}H_{E}$ 와 ${}^{B}T_{E}$ 는 각각 관성모멘트와 외부에서 가한 토크를 나타낸다.

3.3.5 Actuator and Ground Reaction Force

식 (42)을 이용하여 상판의 조인트 끝에 발생하는 반력(reaction force)

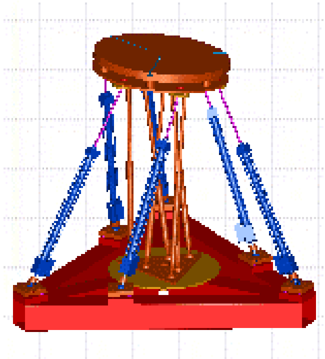
${}^{i}f_{biz}$ 를 구할 수 있으며, z_i 축을 따라 i 번째 피스톤에 작용하는 힘의 합을 통하여 구동력(Actuating Force) t_i 를 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{t}_i = {}^{i}f_{biz} + m_2 g_c c\boldsymbol{q} + m_2 \, {}^{i}\dot{v}_{2iz} \tag{42}$$

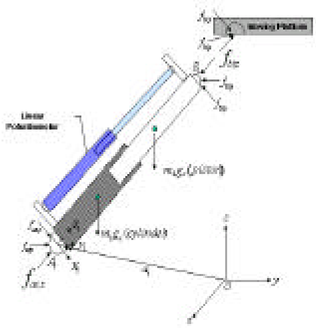
4. 스튜어트 플랫폼의 계측 및 제어

4.1 스튜어트 플랫폼의 계측

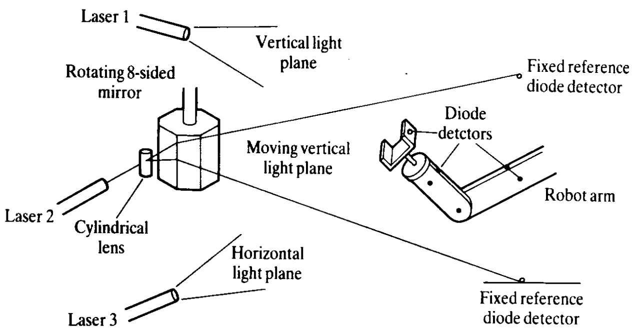
본 논문은 스튜어트 플랫폼의 물리적 원리를 이해하고 매개 변수를 측정하여 보다 나은 측정치 데이터로 시뮬레이터로서 제어하는 것이다. 센서(Sensor)들의 종류는 매우 많기 때문에 일반적으로 센서는 요구되는 특성에 따라 분류된다. 어떠한 특성이 요구되는가는 기술 분야에 따라 다르다. 센서 사용자는 보통 센서가 수행하는 기능에 관심이 높다. 즉, '무엇을 특정하는가?' 그리고 '어느 정도의 해상도와 정확도를 가지는가?' 등등이다.



[Fig.4.1] 플로리다 주립대학의 스튜어트 플랫폼



[Fig.4.2] 액츄에이터 접촉식 계측



[Fig.4.3] 레이저를 이용한 비접촉식 매니퓰레이터 계측

스튜어트 플랫폼이라는 병렬형 로봇을 계측함에 있어서 성능측정, 제어를 위한 매개변수 측정으로 크게 나누어 볼 수 있다. 성능측정에는 대상체의 위치, 속도, 가속도 등을 측정하여 목표 성능에 도달하는지를 점검하는 것이고, 제어를 위한 매개변수 측정은 스튜어트 플랫폼의 목적에 따라 정밀위치 제어, 시뮬레이터, 반력 장치, 힘 계측장치 등의 목적에 따라 필요한 데이터를 계측하여 피드백(Feed back)을 한다.

로봇 계측에는 크게 2가지로 분류할 수 있다. 접촉식과 비접촉식으로 나누어진다. 접촉식과 비접촉식의 차이점은 감지 대상 물체 사이의 공간적 관계로서 접촉식은 비용 부담이 적고 공간을 적게 차지하는 반면에 비접촉식은 비용 부담이 크고 공간을 크게 차지한다. 그러나, 접촉식은 센서 자체의 비선형적 요소뿐 아니라 감지 대상 물체 자체의 노이즈(noise)나 비선형적 요소를 모두 포함하고, 비접촉식은 대상 물체의 비선형적 요소를 포함한 관측을 수행할 수 있고 센서자체의 성능만이 대상 물체를 감지하는 한계 요소이다.

[Fig.4.1]은 플로리다 대학원의 CIRMA Lab.에서 항공기용 시뮬레이터 개발 시 계측용 시스템의 그림이다. 계측 플랫폼의 6개의 Linear Potentiometer는 절대 좌표계로 보고 있는 하판과 Moving Platform인 상판에 직접 연결하고 Forward Kinematics를 통하여 상판의 Translation과 Rotation를 다시 구동 플랫폼에 Inverse Kinematics를 통하여 액츄에이터의 길이를 계산한다. 즉, 액츄에이터의 길이를 비접촉 방법을 통하여 계측한다. 본 논문에서는 플로리다 대학의 시뮬레이터 계측 시스템의 구성을 보고 그 의미를 분석한 것이다. [Fig.4.2] 2는 상판의 6자유도 운동을 제어하기 위하여 액츄에이터의 길이 계측을 위해 Linear Potentiometer를 액츄에이터에 직접 접촉하여서 계측한다. 실험에서는 액츄에이터에 직접 Linear Potentiometer를 장착하지 않고 접촉식 데이터는 엔코더의 값으로 대체 하였다. Linear Potentiometer를 직접 액츄에이터에 장착한 것과 의미는 다르지만 상판의 운동을 계측하는 것이

본 목적이므로 비교 데이터로 엔코더(encoder) 값으로 대체하였다.

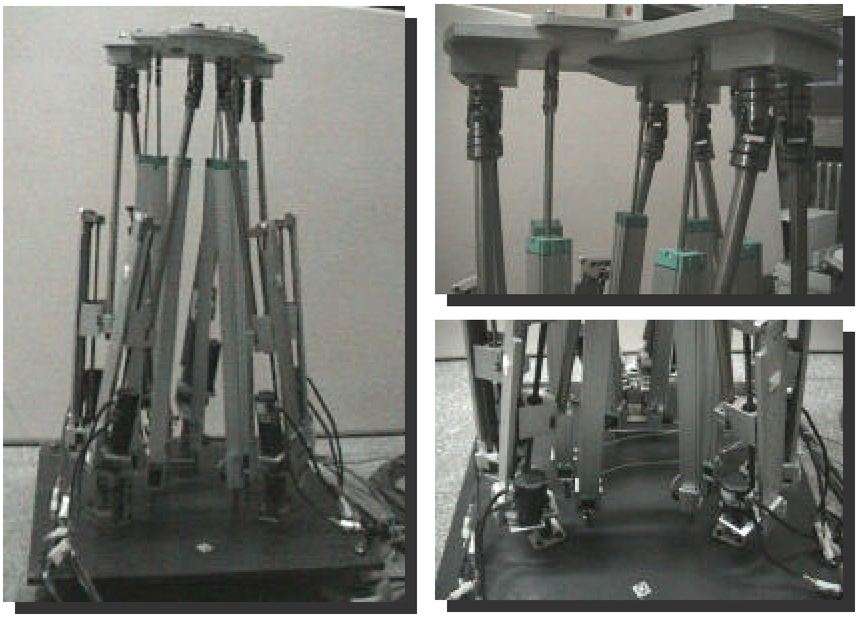
AC Servo Motor는 CSMZ-01BA 1ANM3 단상 220V, 정격출력 100W 용량의 모터이며 엔코더는 11선식 2500펄스 형식이다.

[Fig.4.3]은 상판의 좌표계과 하판의 좌표계 밖의 제 3의 절대 좌표계에서 계측하는 것으로서 상판의 좌표계와 액츄에이터의 좌표계의 병진운동(translation)과 회전운동(rotation)을 비접촉식으로 계측한다. 또 다른 방법으로는 상판에 직접 가속도, 각가속도 센서 등을 직접 달아서 그 값을 계측 값으로 하는 방법이 있으나 상판의 위치, 속도, 가속도, 액츄에이터의 길이를 구함에 있어서 많은 노이즈(noise)와 분석의 어려움이 있다.

본 논문에서는 구동 플랫폼의 액츄에이터에 Linear Potentiometer를 직접 부착하지 않고 구동 플랫폼 속에 계측 플랫폼을 액츄에이터와 분리하여 상판과 하판에 직접 설치 함으로써 스튜어트 플랫폼의 성능측정과 제어를 위한 매개변수 측정을 동시에 측정하였다.

4.2 스튜어트 플랫폼의 순기구학을 이용한 계측

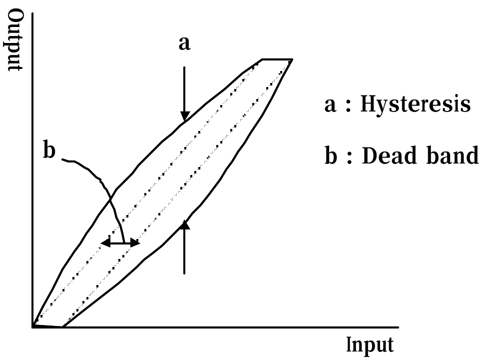
다음의 [Fig.4.4]에서 스튜어트 플랫폼은 액츄에이터에 직접 Linear Potentiometer를 장착하지 않고 계측 플랫폼의 형태로서 액츄에이터의 상판과 하판에 직접적으로 장착한 모습을 나타내었으며, 직접 장착의 목적은 계측 플랫폼으로써 성능측정과 제어용 피드백 데이터 값을 계측하기 위함이다. 계측 플랫폼으로서 성능측정의 목적으로는 6개의 Linear Potenti-ometer의 값을 가지고 Forward Kinematics를 수행하여서 상판의 Roll, Pitch, Yaw, Vertical, Lateral, Longitudinal의 6자유도의 거동을 관측한다. 제어용으로는 상판의 6자유도의 값을 구동 플랫폼에 Inverse Kinematics를 통하여서 6개의 액츄에이터의 길이를 계측하였고, 그 값을 피드백 하여 기준입력(Reference input)으로 한다.



[Fig.4.4] 계측 스튜어트 플랫폼 시스템

4.3 스튜어트 플랫폼의 계측 시스템 성능 분석

4.3.1 Hysteresis & Dead Band



[Fig.4.5] 입출력에 대한 Hysteresis 와 Dead Band

[Fig.4.5]는 Dead Band와 Hysteresis에 대한 그림이다. Dead Band는 액츄에이터를 올리려는 신호를 주다가 그 반대신호를 주어 반응이 나타나는

신호 값의 차를 말한다. 신호가 작을수록 좋은 성능이라고 볼 수 있다.

테스트 방법은 다음과 같다.

(a) 위치 변화가 일어날 때까지 입력을 천천히 변화시킨다.

(b) 입력 값을 기록한다.

(c) 반대방향으로 입력을 위치변화가 일어날 때까지 천천히 변화 킨다.

(d) 입력 값을 기록한다.

(e) 두 입력 값의 사이의 차이가 dead band이다. 여러 번의 테스트를 거쳐서 최대값으로 결정한다. 이상 행정의 백분율로 표현한다.

Hysteresis는 밸브의 올라갈 때의 위치와 내려올 때 위치 차이를 말한다. 같은 신호라도 올릴 때와 내릴 때는 차이가 발생하게 되는데 그 차이가 적을수록 좋은 성능이라 할 수 있다. Hysteresis는 그 영향이 Dead Band의 영향과 결합되어 나타난다. 이 두 영향의 합(Sum)은 임의의 한 Cycle에 대한 동일한 Up-scale과 Down-scale 위치간의 최대 차이이다.

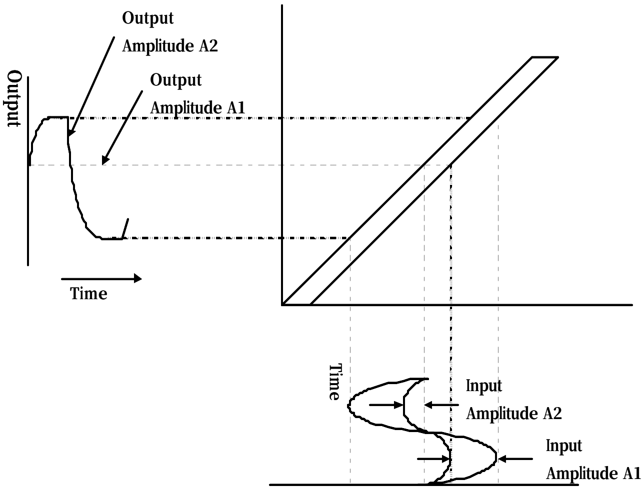
Hysteresis는 입력에 대한 Hysteresis와 Dead Band의 합으로부터 Dead Band의 값을 빼서 구한다. 최대 오차를 기록하며 이상적인 행정량의 백분율(%)로 표현한다.

예) Hysteresis가 이상 행정의 0.12%이다.

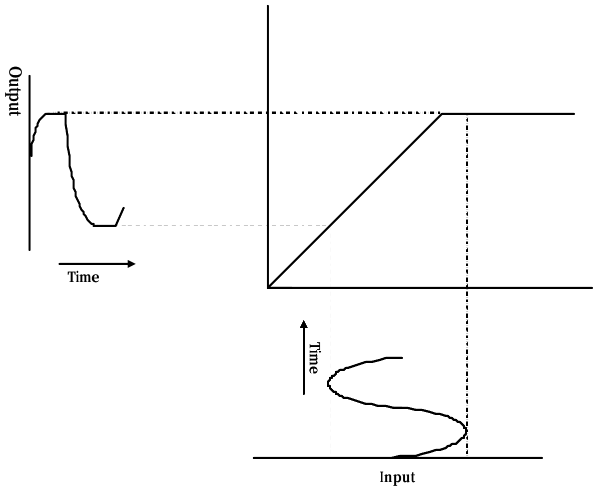
4.3.2 동적 특성에 관한 테스트

실험 장치의 동적 응답은 정의된 시간 종속적 입력 신호로 인한 시간 종속적인 출력 신호 변화로 정의 한다. 임펄스를 포함한 일반적으로 사용되는 신호는 펄스파, 계단파, 램프, 시뉴소이드형이 있다. 이러한 설계의 동적 해석은 정적 시험으로부터 나온 데이터를 만족하여야 한다.

값은 시험 장치가 선형으로 작동하거나 입력 진폭이 선형 범위 내에 유지 될 때까지 줄어든 경우보다 작다.



[Fig.4.6] Dead Band가 출력에 미치는 정상상태 요소의 특성



[Fig. 4.7] 포화상태가 출력에 미치는 정상상태 요소의 특성

(a)위치 포화 : 주파수 응답 시험이 입력 진폭 측정과 함께 수행된다면,이득 값은 시험 장치가 선형으로 작동하거나 입력 진폭이 선형 범위 내에 유지 될 때까지 줄어든 경우보다 작다.

⒝ 속도 포화 : 평균 수준이 중간 범위에서 선택되거나, 진폭을 전체 입력 행정의 50%로 선택하면, 쉽게 시험할 수 있는 특성을 갖는다. 매우 낮은 주파수에 서는 문제없다. 하지만, 물리적 요소는 보다 높은 주파수에서 포화의 유발에 의해 속도에서의 물리적 한계를 얻는다.

4.4 스튜어트 플랫폼의 제어

일반적으로 많이 사용되는 매니퓰레이터의 위치제어 방법으로서 PID제어와 모델-기준 제어(Model-Based Control)방법이 있다. 그러나 파라미터를 정확하게 알고 있어야 한다는 문제 때문에 복잡한 모델기준 제어법칙을 계산해야 하는 것이 의미가 있는지는 확실치 않으며, 이러한 점 때문에 최근의 산업용 로봇제어 시스템은 오차에 의해서만 구동 되는 간단한 PID 제어 등을 대부분 사용하고 있다.

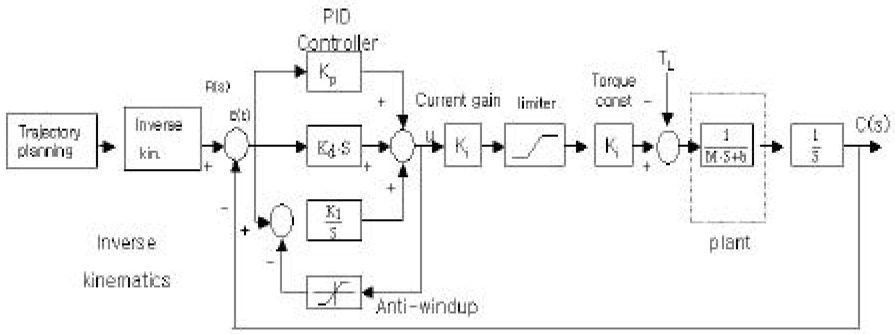
PID제어기의 장점은 매니퓰레이터의 동역학적 모델을 사용하지 않기 때문에 구현이 쉽고, 계산 부하(Computer Load)가 적으며 동역학적 불확실성(Dynamic Uncertainties)에 비교적 강인하다는 점이고, 단점으로는 정확한 동역학적 모델을 사용하는 모델기준 제어방법에 비교하여 추종 성능(Tracking Performance)이 좋지 않다는 점이다.

[Fig.4.8]은 본 논문의 병렬 매니퓰레이터에 대한 조인트 공간에서의 PID제어 블록선도를 나타낸다. 기준 입력 R(s)는 직각좌표 공간에서의 말단장치의 원하는 궤적이며 Inverse Kinematics에 의해 조인트 공간에서의 각 링크의 궤적 입력이 된다. PID제어기의 전달 함수 $G_c(s)$는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{44}$$

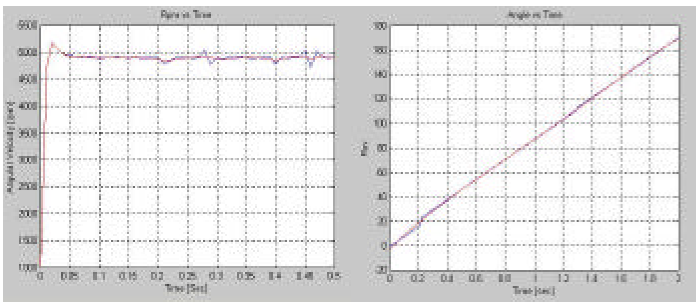
여기서 Kp는 오차에 비례하는 이득이고, Kd는 오차의 미분에 비례하는 이득이며, Ki는 오차의 적분에 비례하는 이득이다. 실제로 설계된 제어기는 액츄에이터가 포화 되었을 때 적분오차가 계속 증가하는 것을 방지하는

적분기의 “Anti-Windup”을 포함하고 있다.

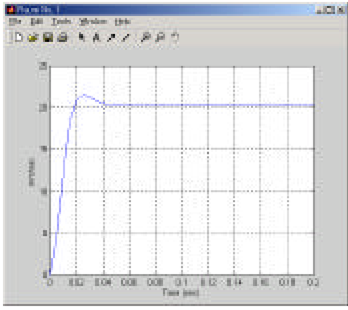


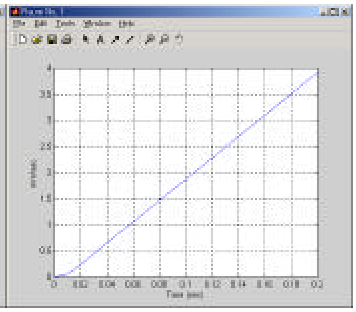
[Fig4.8] 조인트 공간에서의 PID 제어기(With Anti-Windup)

본 논문의 병렬 매니퓰레이터에 PID제어를 적용하기 위하여 상판과 하판 사이의 전체 구조인 매니퓰레이터를 하나의 모델로 보고 1[V] 입력에 따른 과도응답을 통하여 실험적으로 전달함수를 구하였다.

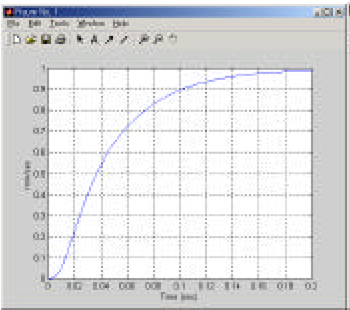


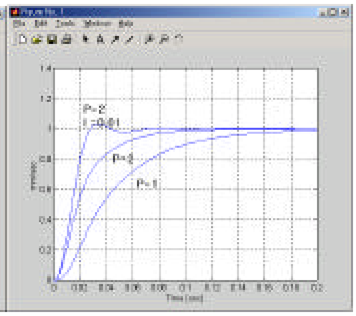
[Fig.4.9] 액추에이터의 거동





(a)Step 1volt 의 속도　　　　(b)Step input 의 위치



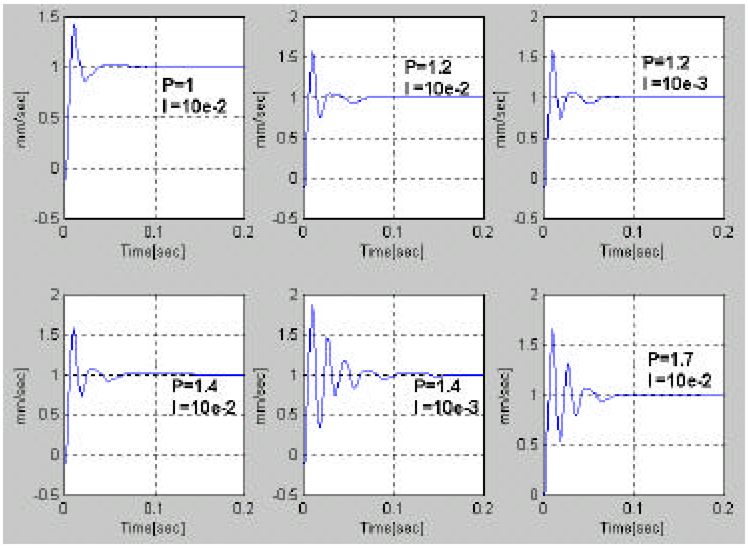


(c)Closed loop 의 위치　　　　(d) 제어기 설계에 따른 위치

[Fig.4.10] 제어기에 따른 응답

[Fig.4.10]의 그림 (a)는 1Volt의 Step입력에 따른 축 하나의 과도 응답이다. 그림(a)에서 구한 모델을 이용하여 위치를 출력으로 하는 Open-loop 모델을 세워서 Step input를 실시하여 그 과도응답을 보았다. 그림(a),(b)는 [Fig.4.9]와 일치 함을 알 수 있다. 따라서 위치의 입력에 대한 피드백을 실시한 그림(c)를 바탕으로 제어기를 설계하여 그 응답을 보이는 것이 그림(d)이다.

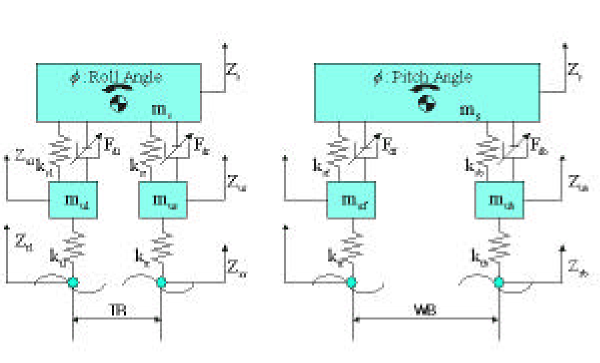
다음 [Fig.4.11]은 한 축의 각 Gain값에 따른 실제 응답을 나타내었다.



[Fig.4.11] 각Gain 값에 따른 실제응답

Step입력에 대한 이득조정(Gain Tuning)을 한 후 직선과 원을 그리는 작업을 하였을 때의 실험 하였다.

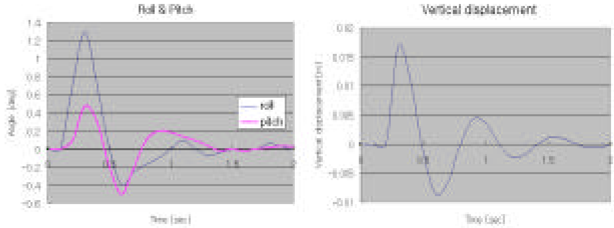
4.5 스튜어트 플랫폼의 입력 데이터(1/2Car Model)



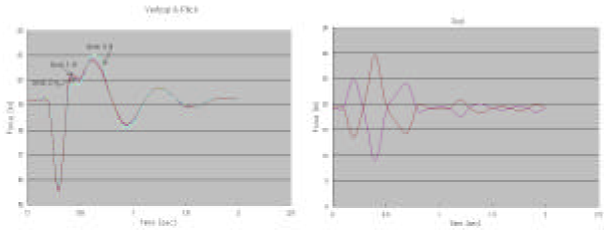
[Fig. 4.12] Half Car Model

위의 [Fig.4.14]와 같이 모델을 세워서 시속 60Km/h의 속도로 폭 1m,높이 5cm의 Bump통과 시 2초간의 시뮬레이션을 실시 한 결과 차량의

거동을 아래 그림에 나타내었다. 시뮬레이션 실시한 결과의 데이터를 가자고 스튜어트 플랫폼의 입력 데이터로 시뮬레이션 한다.



[Fig.4.13] Half Car Model Simulation



[Fig.4.14] Dynamics Analysis

위의 그림은 Half Car 모델의 시뮬레이션 결과를 Inverse Dynamics로 Platform을 시뮬레이션 한 결과이다. 상판의 질량관성 모멘트는 CATIA를 이용한 모델링으로부터 값을 얻을 수 있었다.

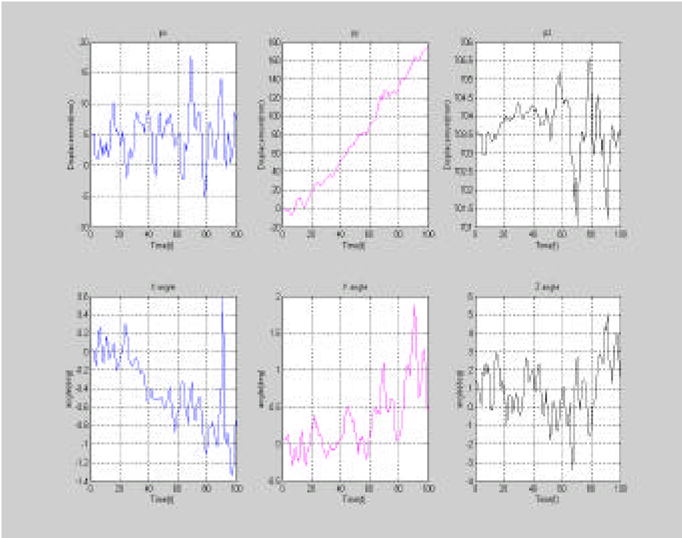
5. 실험 및 결과 분석

5.1 Y축 병진, Roll, 원운동 모션 실험

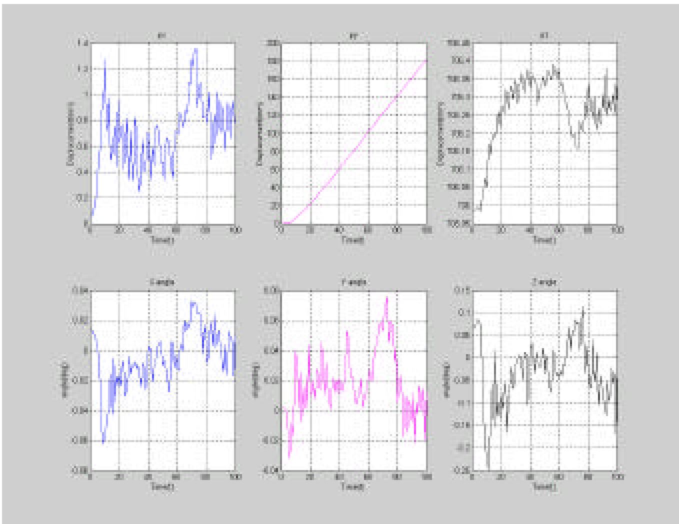
스튜어트 플랫폼의 계측 관점과 제어용 피드백데이터로 쓰일 센서의 관점으로 실험 하였다. 크게 2가지 방법으로 실험 하였다. 첫번째는 스튜어트 플랫폼의 6자유도 중에서 5방향을 고정시키고 1가지의 운동만을 입력으로 하였을 때 플랫폼의 Roll, Pitch, Yaw, Vertical, Lateral, Longitudinal의 6자유도 실제 모션을 계측하였다. 두 번째는 4방향을 고정으로 하고 X축 병진과 Y축 병진의 두 가지를 입력으로 하는 상판의 원운동을 입력으로 하였다.

2가지 방법 모두 2가지 방법으로 실험하였다. 첫번째는 엔코더의 길이를 액츄에이터의 길이로 하는 제어용 피드백신호로 사용하였고, 두 번째는 계측플랫폼에서 나오는 6개의 Linear Potentiometer에서 나오는 Volt신호를 가지고 계측플랫폼의 순기구학을 거쳐 상판의 모션을 계측하고 다시 상판의 모션 데이터를 가지고 구동플랫폼의 역기구학을 통하여 액츄에이터의 길이를 계산하여 제어용 피드백신호로 사용하였다.

병진운동 직선 운동보다는 원 운동을 하는 경우가 훨씬 가혹한 조건이므로 원 운동에 대한 실험 결과만을 고찰해 보면, 각 링크에서의 기준입력 추종결과는 처음 출발할 때와 링크의 운동방향이 바뀌는 순간에 가장 오차가 많이 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 정지마찰에 의한 영향으로 인해 추종오차가 생기는 것으로 볼 수 있으며, 특히 처음 출발할 때와 링크의 방향이 바뀌는 순간에는 속도가 아주 느리게 되므로 정지마찰에 의한 영향이 더욱 커지게 된다. 결과적으로 나타나는 직각좌표 공간에서의 조인트의 운동궤적을 볼 때, 직선운동에서는 처음 출발할 때 3개의 링크에서 거의 비슷하게 오차가 생기므로 조인트에서의 추종오차는 거의 발생하지 않으나 원운동에서는 3개의 링크에서 서로 다른 위치에 오차가 생기므로 원의 6개의 위치에서 굴곡이 생김을 알 수 있다.



[Fig.5.1] Encoder 값 Feedback 의 Y - 직선 운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션



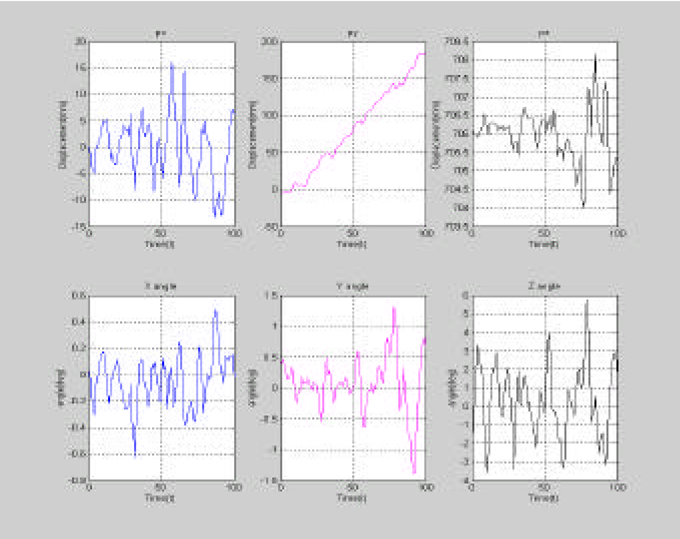
[Fig.5.2] Encoder 값 Feedback 의 Y - 직선 운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션

Y축 병진운동 실험은 5방향을 고정시키고 Y축 방향의 병진운동만 일정속도의 움직임을 입력으로 하는 실험이다.

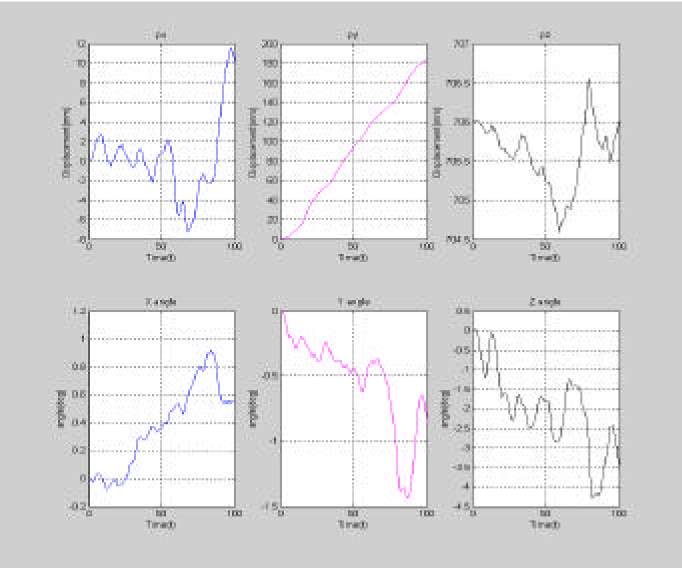
Fig.5.1은 엔코더의 신호를 액츄에이터의 피드백 신호로 하여 상판의 모션의 5방향을 고정시키고 일정속도 Y축 병진운동 입력에 따른 상판의

6자유도 모션을 보이는 그래프로서 계측플랫폼으로 구한 그래프이다.

Fig.5.2는 Fig5.1과 같이 동일 피드백 신호와 동일 상판 모션입력에 따른 스튜어트 플랫폼 구동 시 계측플랫폼으로 상판의 모션을 관측한 그래프이다.



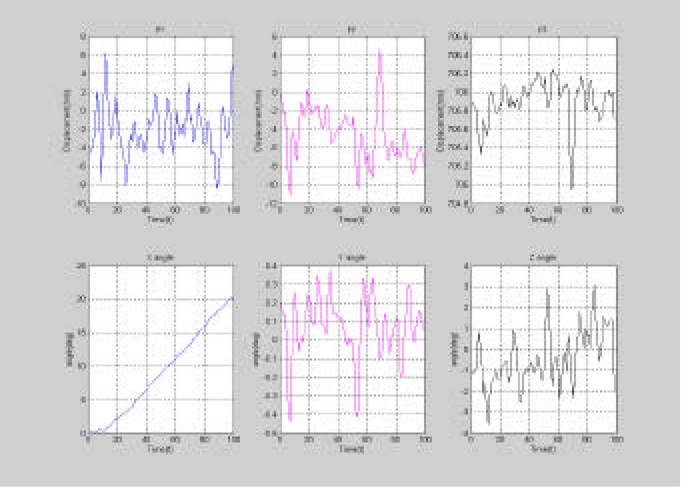
[Fig.5.3] 계측플랫폼값 Feedback 의 Y - 직선 운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션



[Fig.5.4] 계측플랫폼값 Feedback 의 Y - 직선 운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션

Fig.5.3는 계측플랫폼과 순기구학을 통해 구한 상판의 모션 데이터를 다시 구동플랫폼에 역기구학을 통한 액츄에이터의 길이를 피드백 신호로 하여 상판의 모션의 5방향을 고정시키고 일정속도 Y축 병진운동 입력에 따른 상판의 6자유도 모션을 보이는 그래프로서 계측플랫폼으로 구한 그래프이다.

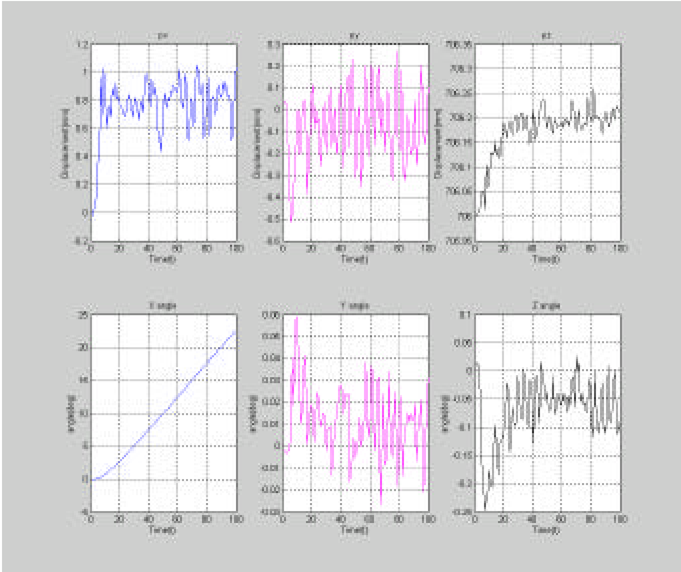
Fig.5.4은 Fig5.3과 같이 동일 피드백 신호와 동일 상판 모션입력에 따른 스튜어트 플랫폼 구동 시 엔코더 값으로 상판의 모션을 관측한 그래프이다.



[Fig.5.5] Encoder 값 Feedback 의 Roll 운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션

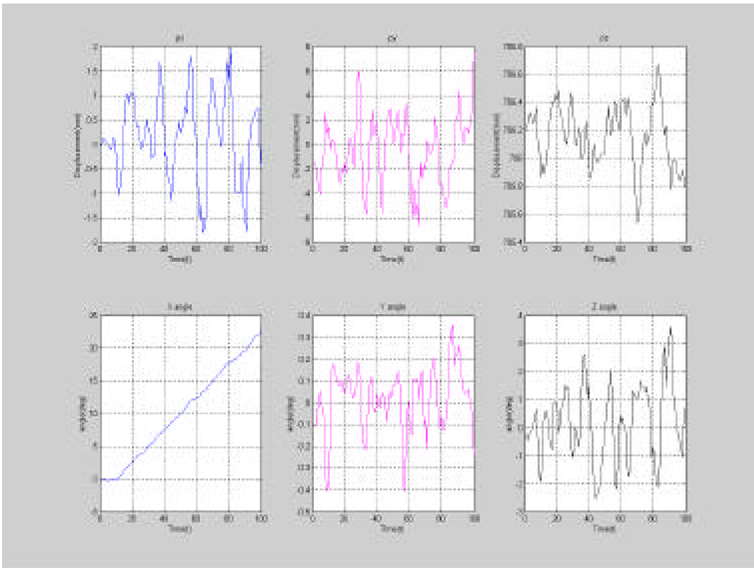
X축 회전운동 실험은 5방향을 고정시키고 X축 방향의 회전운동만 일정 속도의 움직임을 입력으로 하는 실험이다.

Fig.5.5은 엔코더의 신호를 액츄에이터의 피드백 신호로 하여 상판의 모션의 5방향을 고정시키고 일정속도 X축 회전운동 입력에 따른 상판의 6자유도 모션을 보이는 그래프로서 계측플랫폼으로 구한 그래프이다.

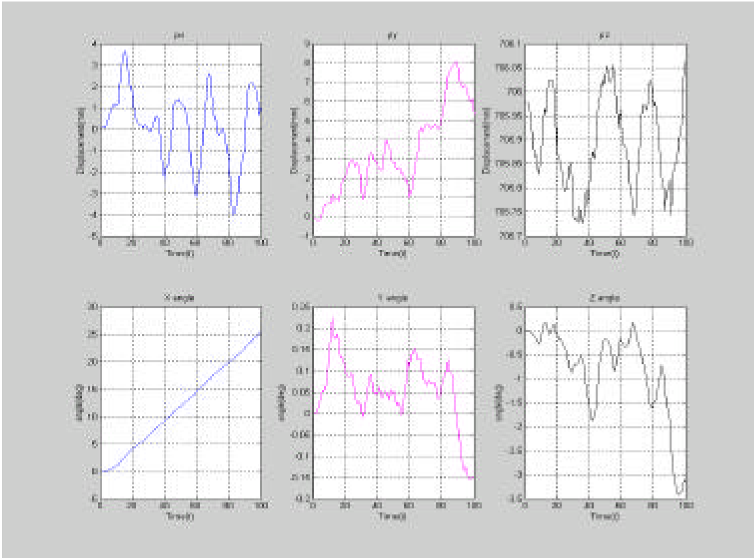


[Fig.5.6] Encoder 값 Feedback 의 Roll 운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션

Fig.5.6는 Fig5.5와 같이 동일 피드백 신호와 동일 상판 모션입력에 따른 스튜어트 플랫폼 구동 시 계측플랫폼으로 상판의 모션을 관측한 그래프이다.



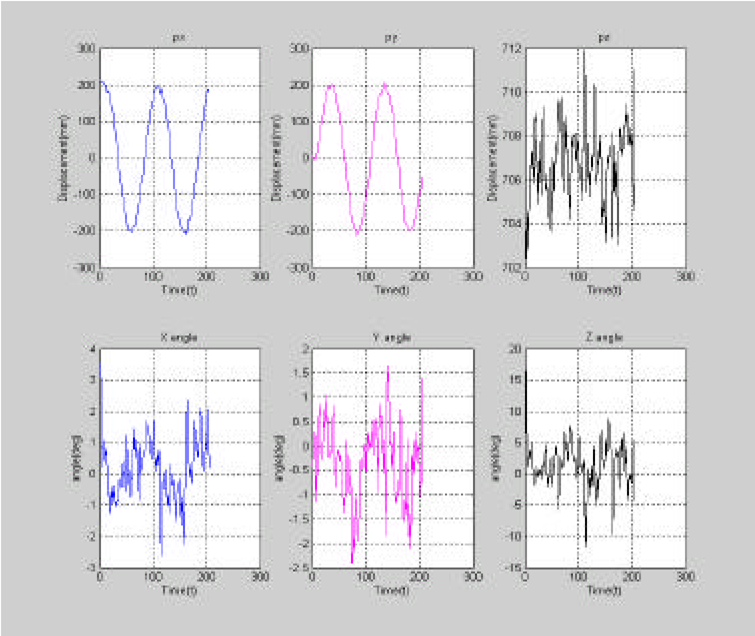
[Fig.5.7] 계측플랫폼값 Feedback 의 Roll 운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션



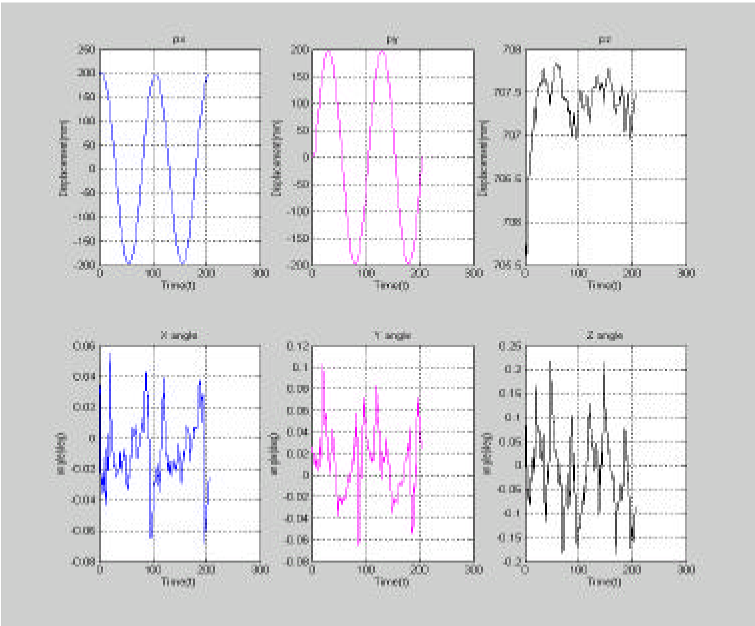
[Fig.5.8] 계측플랫폼값 Feedback 의 Roll 운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션

Fig.5.7는 계측플랫폼과 순기구학을 통해 구한 상판의 모션 데이터를 다시 구동플랫폼에 역기구학을 통한 액츄에이터의 길이를 피드백 신호로 하여 상판의 모션의 5방향을 고정시키고 일정속도 X축 회전운동 입력에 따른 상판의 6자유도 모션을 보이는 그래프로서 계측플랫폼으로 구한 그래프이다.

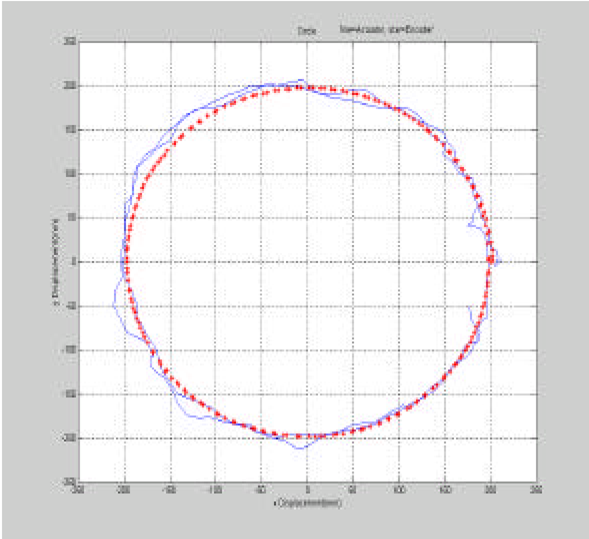
Fig.5.8은 Fig5.7과 같이 동일 피드백 신호와 동일 상판 모션입력에 따른 스튜어트 플랫폼 구동 시 엔코더 값으로 상판의 모션을 관측한 그래프이다.



[Fig.5.9] Encoder 값 Feedback 의 원운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션



[Fig.5.10] Encoder 값 Feedback 의 원운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션



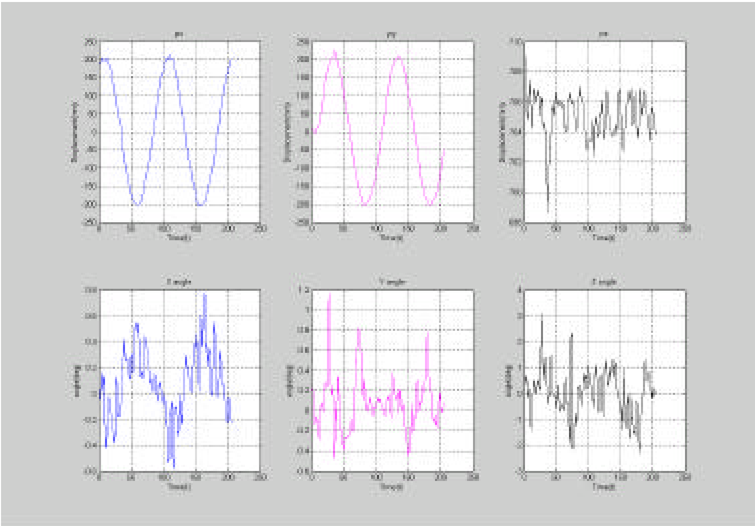
[Fig.5.11] Encoder 값 Feedback 일 때 200mm 원운동 경로

앞의 실험은 스튜어트 플랫폼의 6자유도 중에서 5방향을 고정시키고 1가지의 운동만을 입력으로 하였을 때 이고 이번 실험은 스튜어트 플랫폼의 Roll, Pitch, Yaw, Vertical, Lateral, Longitudinal의 6자유도 실제 모션 중에서 4방향인 Roll, Pitch, Yaw, Vertical값을 고정으로 하고 X축 병진과 Y축 병진의 두 가지를 입력으로 하는 상판의 원운동을 입력으로 하였다. 시간에 따라 액츄에이터의 다양한 길이변화가 있으므로 정확한 계측과 적합한 제어용 신호를 알아보는 관점에서 본 실험의 목적인 입력에 따른 상판의 모션이 서로의 운동에 얼마 만큼의 영향을 미치는가를 관측할 수 있는 주요 실험이다.

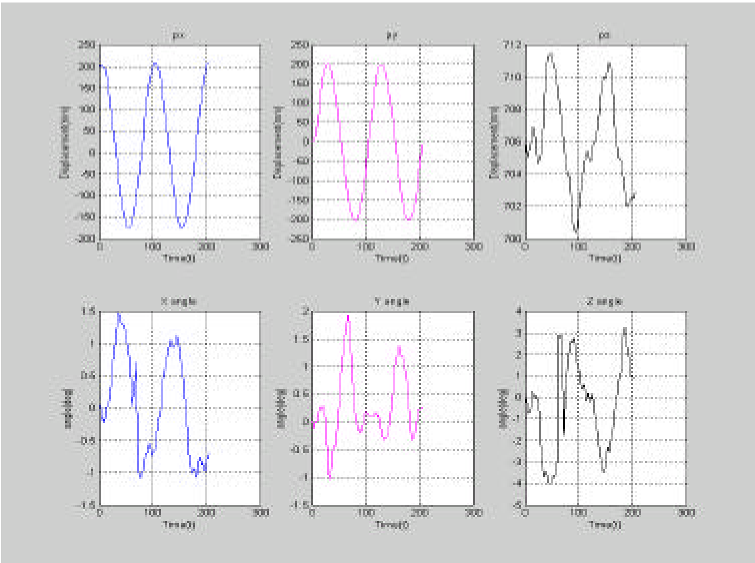
Fig.5.9는 200mm 원운동을 입력으로 하는 실험으로서 4자유도를 0으로 하고 상판의 병진운동 중 X, Y방향을 입력으로 하며 Encoder값을 제어용 피드백 데이터로 하는 실험에서 계측플랫폼으로 Encoder로 상판의 6자유도를 그래프로 표시 하였다. Fig.5.10은 Encoder값을 가지고 Forward Kinematics를 통해서 얻은 상판의 6자유도 그래프이다.

Fig,5,11은 XY평면에서의 상판의 모션 궤적이다. Line은 계측플랫폼의

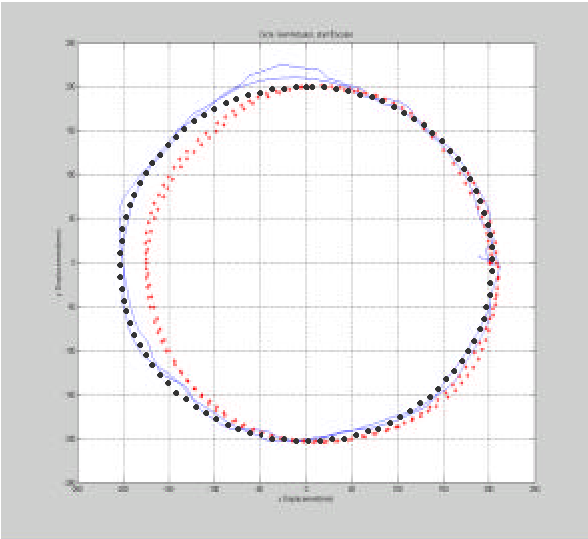
궤적이고 “*”는 Encoder에 의한 궤적이다.



[Fig.5.12] 계측플랫폼값 Feedback 의 원운동일 때 순기구학에 의한 플랫폼의 모션



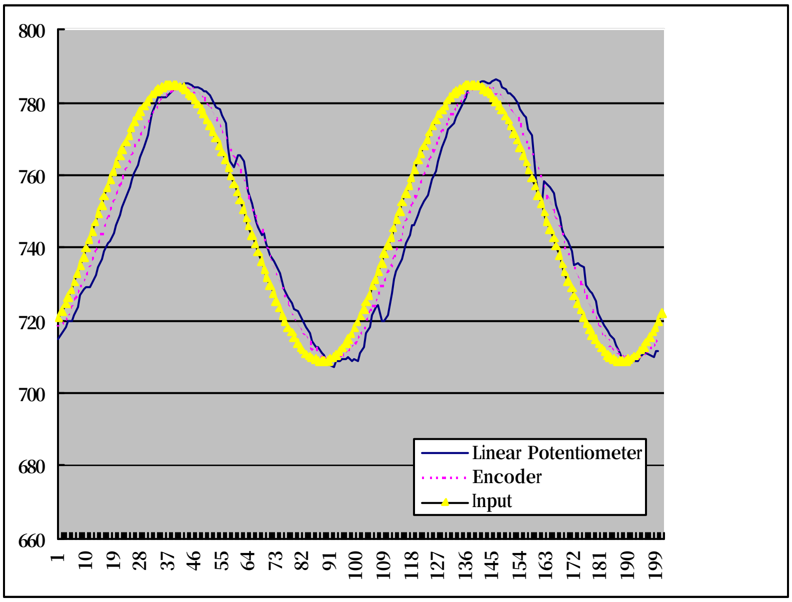
[Fig.5.13] 계측플랫폼값 Feedback 의 직선 운동일 때 Encoder 에 의한 플랫폼의 모션



[Fig.5.14] 계측플랫폼값 Feedback 일 때 200mm 원운동 경로

Fig.5.12는 200mm 원운동을 입력으로 하는 실험으로서 4자유도를 0으로 하고 상판의 병진운동 중 X, Y방향을 입력으로 하며 Linear Potentiometer 값으로 Forward Kinematics를 통하여 상판의 모션을 구하고 그 값을 다시 구동플랫폼의 Inverse Kinematics를 통하여 액츄에이터의 길이를 구하여 플랫폼 구동 시 제어용 피드백 데이터로 하는 실험에서 계측플랫폼으로 상판의 6자유도를 그래프로 표시 하였다. Fig.5.13은 Encoder값을 가지고 Forward Kinematics를 통해서 얻은 상판의 6자유도 그래프이다.

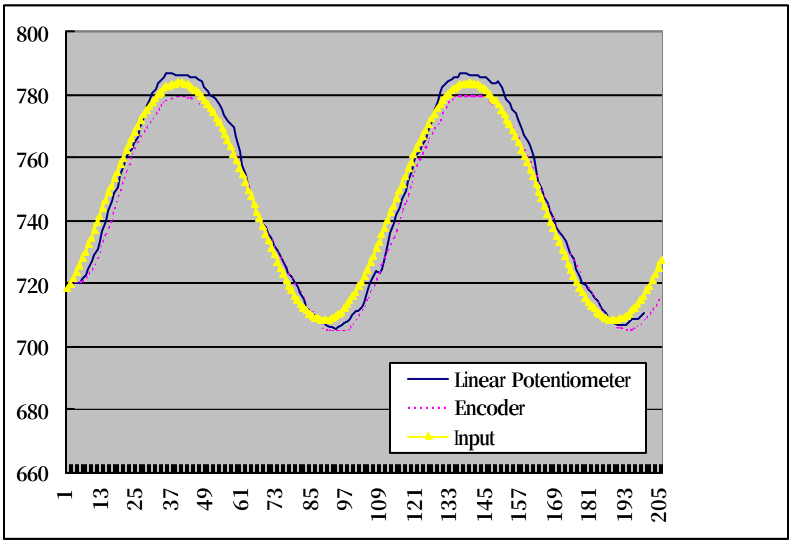
Fig,5,14은 XY평면에서의 상판의 모션 궤적이다. Line은 계측플랫폼에 의한 궤적이고 "*"은 Encoder에 의한 궤적이다.



[Fig.5.15] 200mm 원운동 중 Encoder 값 Feedback 일 때 1 번 액츄에이터 경로

Fig.5.15는 Encoder값을 제어용 피드백 데이터로 했을 때의 액츄에이터 1번의 경로를 보여주며 그 값들은 Input, Encoder값, Linear Potentiometer을 Forward Kinematics를 통하여 계산 되어진 1번 액츄에이터의 길이값 경로이다.

액츄에이터 자체만큼은 충실히 목표 값을 잘 추종하지만 계측플랫폼에 의하여 계산되어진 액츄에이터 1번은 중간에 조금씩 그 값이 튀는 것을 알 수 있다. 그 원인으로는 계측 플랫폼자체의 Linear Potentiometer의 Error값과 기계 시스템인 구동플랫폼의 기계적 Error이 합하여져서 나온 값이라 하겠다.



[Fig.5.15] 200mm 원운동 중 계측플랫폼값 Feedback 일 때 1번 액츄에이터 경로

Fig.5.16는 계측플랫폼에서 나온 액츄에이터의 값을 제어용 피드백 데이터로 했을 때의 액츄에이터 1번의 경로를 보여주며 그 값들은 Input, Encoder값, Linear Potentiometer을 Forward Kinematics를 통하여 계산 되어진 1번 액츄에이터의 길이 값 경로이다.

Fig.5.14의 그래프에서 보면 기계 시스템 Error인 중간에 튀는 값을 볼 수 있다. 그러나, Fig.5.15에서는 계측플랫폼 시스템의 Linear Potentiometer가 내포하고 있는 Noise만이 계측플랫폼의 Error로 나타나고 있다. 기계시스템 Error만큼을 보정하기 위하여 임의의 상태에서 계측플랫폼이 액츄에이터의 원치 않는 변화도 감지하여 그 상태를 제어기로 보상하여 Input값에 적절히 추종하는 것을 알 수 있다. 그러므로 액츄에이터는 계측플랫폼에 의하여 Input Data와는 다른 거동을 보임을 알 수 있다.

6. 결　론

본 연구는 차량 시뮬레이터에 의한 원격주행차량에 관한 연구로서 차량 시뮬레이터의 정확하고 정밀한 운동 재현을 목적으로 한다.

1.정밀한 운동을 하기 위해 피드백 데이터로서 정밀한 액츄에이터의 계측을 필요로 하며 계측장비이며 제어용 데이터로 활용 가능한 계측플랫폼을 구상하여 제작하고 실험하였다.

2.Y-병진, Roll-회전 운동 시에는 계측플랫폼으로 제어용 피드백을 하여 스튜어트 플랫폼을 구동하는 것보다는 Encoder의 데이터를 가지고 제어용 피드백 데이터를 가지고 스튜어트 플랫폼을 구동하는 것이 나은 성능을 보였다. 그러나 6자유도의 구동 측면에서는 전체적으로 계측플랫폼이 Input 값을 잘 추종함을 볼 수 있다.

3.원운동인 4자유도를 고정시키고 X-Y병진운동만을 가지고 스튜어트 플랫폼을 구동 시 기계적Error을 가지고 있는 우리 스튜어트 플랫폼에서는 Encoder값을 제어용 피드백 데이터로 구동하는 것보다는 계측플랫폼에서 얻은 데이터로 스튜어트 플랫폼을 구동하는 것이 더 나은 성능을 보이고 있다. 물론, 계측플랫폼도 Linear Potentiometer의 노이즈에 의한 Sensor Error을 가지고 있지만 상판과 하판의 상대 위치에 따른 액츄에이터의 기계적 유격, 백래쉬 등의 비선형적 요소를 포함한 계측에 따른 데이터를 가지고 피드백하는 것이 장점이 될 수 있음을 알 수 있다.

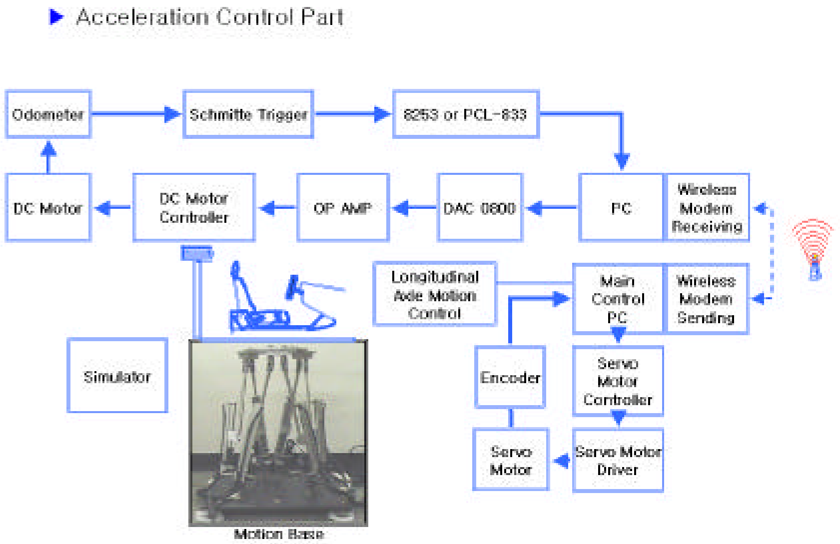
4. 계측플랫폼의 응용 : 일정 값 이상의 원운동 시 일부 액츄에이터에서 장력 발생을 힌트로 하여 액츄에이터의 상태 점검을 실시 할 수 있다. 즉, 배이스 반경을 넘어서는 실험으로 일부 액츄에이터에 장력이 발생하고 그 장력에 의해 액츄에이터의 데이터 분석에 따라 파손 위험 등을 감지 할 수 있다. 따라서 Appendix에서 특허준비중인 돌발상황 발생시의 안정장치 시스템 구성의 아이디어를 추가 한다.

5.차량용 시뮬레이터로서 Half-Car 모델의 Bump통과 시뮬레이션 데이터를 입력으로 한 결과 큰 차이는 없었다.

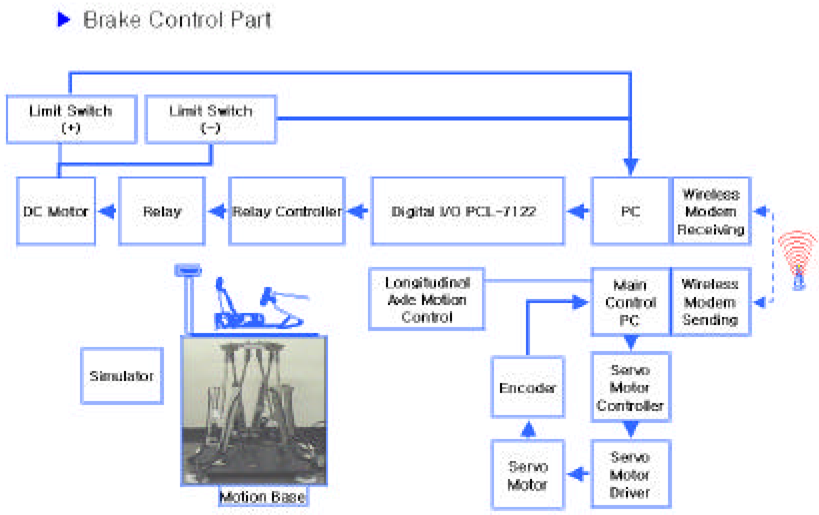
6.정밀한 계측이 가능한 필터 또는 Linear Encoder을 활용한다면 보다 정밀한 상대 위치를 계측하여 시뮬레이터로서 정밀하고 정확한 운동 묘사가 가능하다.

7.Forward Kinematics를 이용한 계측플랫폼은 계측플랫폼의 구조와 구동 플랫폼의 구조에서 정밀한 설계를 필요로 한다. 정밀한 설계 값이 없을 때 많은 Error을 포함하게 된다.

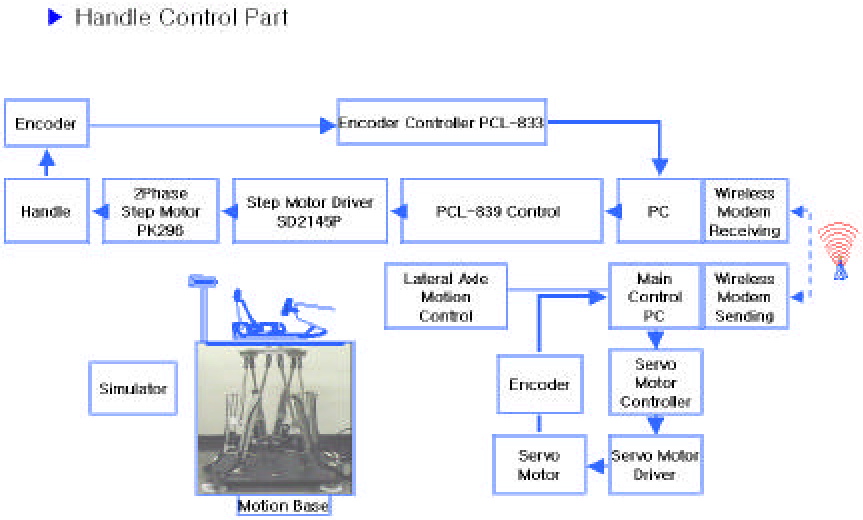
- Appendix 1



- Appendix 2



- Appendix 3



Handle Control Part
Encoder
Encoder Controller PCL-833
Handle
2Phase
Step Motor
PK296
Step Motor Driver
SD2145P
PCL-839 Control
PC
Wireless
Modem
Receiving
Lateral Axle
Motion
Control
Main
Control
PC
Wireless
Modem
Sending
Simulator
Encoder
Servo
Motor
Controller
Servo
Motor
Servo Motor
Driver
Motion Base

참 고 문 헌

[1] Husain, M. and Waldron, K.J., Direct Position Kinematics of the 3-1-1-1 Stewart Platform *Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol. 116, pp.1102~1107, 1994

[2] Husty, M.L., An Algorithm for Solving the Direct Kinematics of Stewart-Gough-Type Platform *to be published*, 1994

[3] Merlet, J.P., Closed-form Resolution of the Direct Kinematics of Parallel Manipulators using Extra Sensor Data *IEEE International Conferences on Robotics and Automation*, pp.200~204, 1993

[4] Dieudonne, J.E. and Perrish, R.V., An Actuator Extension Transformation for a Motion Simulator and Inverse Transformation Applying Newton- Rhapson Method *NASA tech. Note*, NASA TN D~7067, 1972

[5] Fichter, A Stewart Platform Based Manipulator : General Theory and Practical Construction *international Journal of Robotics Research*, Vol.5, No.2, pp.157~182, 1980

[6] Sugimoto, K., Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by means of Motor Algebra *Transactions od ASME, Journal of Mechanics, Transmissions and Automation in Design*, Vol.109, No.3, pp.3~7, 1987

[7] Zhiming, J., Study of the Effect of Leg Inertia in Stewart Platforms *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.121~126, 1996

[8] Lee, J.D., Albus, J.S., Dagalakis, N.G. and Tsai, T., Computer Simulation of a parallel Link Manipulator *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.5, No.4, pp.333~342, 1989

[9] Lebret, G., Liu, K. and Lewis, F.L., Dynamic Analysis and Control of a Stewart Platform Manipulator *Journal of Robotics and Automation*, Vol.4, No.3,

pp.354~360, 1988

[10] Kurtz, R. and Hayward, V., Multiple-Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.8, No.5, pp.644~651, 1992

[11] Bhattacharya, S., Hatwal, H. and Ghosh, A., On the Optimum Design of Stewart Platform Type Parallel Manipulators *Robotica*,Vol.13, pp.133~140, 1995

[12] D. Stewart, A Platform with Six Degree of Freedom, *Proc. Of Institute of Mech. Engrs*., Vol.180, part 1, no. 5, pp.71~378, 1965

[13] Craig, John J., Introduction to Robotics *Addison Wesley*, 1989

[14] Lung-Wen TSAI, Robot Analysis

Manipulators, *John Wiley & Sons, INC*., 1993

[15] Do, W. Q. D. and Yang, D. C. H, *I*nverse Dynamics of Platform Type of Manipulation Struction *The American Society of Mechanical Engineering,* pp 86~94, 1986

[16] Nair R. and Maddocks J. H., On the Forward Kinematics of Parallel Manipulators *International Journal of Robotics Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 171~188, 1994

[17] **심재흥**, **遠隔 走行을 위한 無人 自動車에 관한 基本設計와 性能分析에 관한 研究 국민대학교 자동차공학 전문대학원 석사학위논문**. 2000

ABSTRACT

The Measurement and Control of Stewart Platform applied to the Tele-operated Vehicle System by forward kinematics

By Lee Gil Young

Graduate School of Automotive Engineering
Kookmin University
Seoul, Korea

In this paper, the integration of driving simulator and unmanned vehicle by means of new concept for better performance through a Tele-operated system is suggested. But autonomous system is one of the most difficult research topics from the point of view of several constrains on mobility, speed of vehicle and lack of environmental information. In these days, however, many innovations on the vehicle provide the appropriate automatic control in vehicle subsystem for reducing human error. This tendency is toward to the unmanned vehicle or the tele-operated vehicle ultimately. This paper describes the motion system. It is developed for a vehicle simulator composed of a six DOF Stewart Platform driven by servo motors. Our vehicle simulator and tele-operated vehicle have lineless serial communication. Tele-operated vehicle and simulator exchange each others motion que. We use general motion que, because the response of vehicle sensor is very rough. We determine Forward kinematics analysis of the motion platform by using numerical methods. Our Stewart Platform has six limbs and six linear potentiometers. Six linear potentiometers are directly connected to the base and the platform except limbs. Six linear

potentiometers exactly determine relative dynamics. We analyze the motion platform using data of limbs and direct connecting linear potentiometers. We analyze performance of two pattern measurement.