

◆특집◆ 병렬기구

병렬기구 동작기계의
구속링크를 사용한 자동 캘리브레이션

류제하*, ABDUL RAUF**

Fully Autonomous Calibration
of Parallel Kinematic Machines Using a Constraint Link

JEHA RYU*, ABDUL RAUF**

Key Words : Autonomous Kinematic Calibration, Parallel Kinematic Machines, Constraint Link

1. 서론

병렬기구 동작기계는 직렬기구 동작기계에 비해 기구의 강성이 뛰어나고 높은 정밀도를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 기구의 제작과정이나 조립공정등에서 발생하는 기구변수 값들의 오차로 인하여 처음 설계시의 정밀도를 얻기가 힘들다. 따라서, 기구의 정밀도를 높이기 위해서는 실제 기구변수 값들을 정확히 추정하기 위한 기구변수 보정(Calibration)과정이 필요하게 되며 제어계에서 보정된 값을 사용하여 동작기계의 정밀도를 크게 향상시킬 수가 있다.

종전의 캘리브레이션 방법에서는 기구 첨단부의 위치 및 방위 정보를 얻기 위해 외부에 추가의 센서가 필요하였다. Zhuang 등^[1]은 Stewart platform

을 캘리브레이션 하기 위해 electronic theodolite 를 사용하였고, Nahvi 등^[2]은 3 자유도의 병렬로봇을 캘리브레이션 하기 위해 LVDT 센서를 사용하였다. Maurine^[3]은 레이저 변위 센서를 이용하여 delta-4 type 병렬기구 로봇의 캘리브레이션 작업을 수행하였다. 이외에도 double ball bar system 을 이용하는 방법(Ota 등^[4]), 두개의 inclinometer 를 사용한 방법(Besnard 등^[5]) 등이 연구되었다. 이처럼 외부의 센서를 사용하는 방법은 여러 기구의 캘리브레이션 과정에 필요한 다양한 캘리브레이션 장치의 제작과 장착에 따른 상당한 시간과 비용이 요구된다. 따라서, 캘리브레이션을 위해 외부에 별도의 측정장치가 요구되지 않는 캘리브레이션 방법이 바람직하다.^[6]

외부센서 없이 캘리브레이션을 수행하는 self-calibration 방법은 경제적이고 자동적이며 빠르다. 이러한 self-calibration 은 기구의 페루프를 이용하여 수행될 수 있다.^[7] Iurascu 와 Park^[8]은 페루프기구에 대한 캘리브레이션 문제를 좌표에 불변한 방식으로 공식화하였고 비선형 구속 최적화 기법으로 해를 구하였다. Self-calibration 을 수행하기 위해서는 여분(redundancy)의 센서 정보가 필요하다. 이러한 여분의 정보들은 기구에 추가의 센서를 부착하는 방법과^[9-11] 기구의 수동조인트를 물리적으로

* 광주과학기술원 기전공학과

Tel. 062-970-2389, Fax. 062-970-2384

Email ryu@kjist.ac.kr

병렬기구형 동작기계, 로봇매니퓰레이터의 해석,설계,제어 및 역감제시장치, 가상현실등에의 적용등에 관심을 두고 연구활동을 하고있다.

** 광주과학기술원 기전공학과

로봇캘리브레이션 분야에서 박사학위 과정중

구속하는 방법들이 있다^[12-14]. Maurine^[13]은 위의 두 가지 방법을 반 자동과 완전자동의 캘리브레이션 방법으로 분류하였다. Zhaung^[9-10]은 Stewart platform 유니버설 조인트에 두개의 각도 센서를 부착하여 캘리브레이션을 수행하는 방법에 대해 설명 하였다. Wampler 등은 Stewart-Gough platform 을 캘리브레이션하기 위해 각 링크의 5 개의 수동조인트에 센서를 사용하였다^[11]. 그들은 수동 조인트의 센서로부터 측정된 각도와 계산된 값 사이의 오차를 최소화 시킴으로써 기구변수 값들을 최적으로 추정하였다. 그러나, 추가의 센서를 사용하는 캘리브레이션 방법은 기구의 설계과정에서 센서의 설치에 대해 고려해야 하며, 센서의 추가로 인해 캘리브레이션 해야 할 기구변수 수가 증가하는 문제를 가지고 있다. 더욱이 정확한 캘리브레이션 작업을 수행하기 위해서는 추가 센서의 정밀도가 매우 높아야 한다. 이에 반해 기구의 수동 조인트에 물리적인 구속을 가하여 캘리브레이션을 수행하는 경우에는 기구 자체의 구동기로 측정된 데이터를 이용하여 기구변수 값을 최적으로 추정할 수 있다. Khalil 와 Besnard^[12]는 유니버설 조인트와 구형 조인트를 구속함으로써 Stewart platform 에 대해 캘리브레이션을 수행하였고, Maurine 등은^[13-15] 이러한 구속을 이용한 캘리브레이션 방법을 HEXA 형의 병렬기구 로봇에 적용하였다. 이처럼 구속을 가하기 위해 사용 되어지는 장치는 조인트나 링크의 변형을 막기위해 매우 큰 강성을 가질 필요가 있다.

구속장치를 이용한 완전 자동의 캘리브레이션을 수행하기 위해서 수동 조인트가 아닌 링크에 구속을 가할 수도 있다. 최근에 Meggiolaro 등은^[16] 직렬기구에 대하여 기구 첨단부의 한점을 외부의 구속장치로 구속하고 기구부의 탄성변형이 고려된 캘리브레이션 작업을 수행하였다.

본 논문에서는 양 끝 단이 구형조인트로 연결되어지는 고정길이를 가진 링크로 첨단부를 구속하는 방법을 이용하여 6 자유도 Hexa Slide 형 동작 기계(HSM)에 대하여 캘리브레이션을 수행하는 방법론을 제시한다. 고정길이의 링크로 첨단부를 구속함으로써 첨단부의 한점은 구면상에서만 움직일 수 있으므로 HSM 은 5 자유도의 운동을 하게 되고 따라서, 단지 5 개의 구동기만이 기구 제어에 필요하다. 그러므로, 구동되지 않고 수동적으로 움직이는 여섯번째 구동기는 슬라이더의 움직인 거리를

측정하는 센서로 사용되어 진다. 이 수동구동기에서 측정되어진 슬라이더의 값과 기구학식으로 계산되어진 슬라이더의 값의 차이가 최소가 되도록 하여 수동으로 설정된 구동기를 포함하는 페루프 상의 기구변수의 실제 값을 구할 수가 있다. 이런 과정을 여섯 개의 구동기에 대해 차례로 적용함으로써 자동화된 캘리브레이션을 수행할 수 있게 되며 이를 역기구학 캘리브레이션 방법이라 명명한다. 이와는 다르게 구속 링크의 길이가 항상 일정한 사실에 착안하여 순기구학식을 가지고 계산되어진 링크 길이 값들 사이의 차이를 최소화 함으로써 캘리브레이션을 수행할 수도 있다.

본 논문의 2 절에서는 Hexa Slide 형 동작기계의 기구구조에 대해서 설명하였고, 3 절에서는 HSM 에 대한 기구학 및 캘리브레이션 방법에 대해서 설명하였으며, 4 절에서는 시뮬레이션을 수행하였다. 마지막으로 5 절에서 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 논하였다.

2. HSM 의 기구구조

Fig 1은 제안된 캘리브레이션 방법이 적용된 Hexa Slide Mechanism(HSM) 의 기구구조 구성도를 보여주며 기구 변수들에 대해서는 Fig 2에서 보여 준다. 그림에서와 같이 기구는 6 자유도를 갖는 **PRRS** 형태의 병렬기구이다. Fig 2에서 A_{i0} 와 A_{i1} 은 각각 6 개의 i 번째 구동기 레일의 시작점과 끝점을 나타내며 A_i 는 이 두 점을 연결하는 선상에 놓여있는 유니버설 조인트의 중심을 가리킨다. 모든 레일은 동일하며 링크의 길이 l 은 6 개의 링크에 대해 같다. 관절변수 λ_i 는 A_{i0} 와 A_i 사이의 거리이며 B_i 는 플랫폼의 구형조인트의 중심을 나타낸다.

플랫폼의 자세는 고정 좌표계(base frame)를 기준으로 하는 좌표계에서 플랫폼의 중심을 나타내는 position vector와 세 개의 Euler angle로 표현된다. Euler angle ψ 는 고정 좌표계의 X 축에 대한 회전각을, θ 는 고정 좌표계의 Y 축에 대한 회전각을, ϕ 는 회전된 좌표계의 Z 축에 대한 회전각을 각각 나타낸다. 이때 플랫폼의 방위(orientation)를 나타내는 행렬 $R = R_{Y,\theta} R_{X,\psi} R_{Z,\phi}$ 이다.

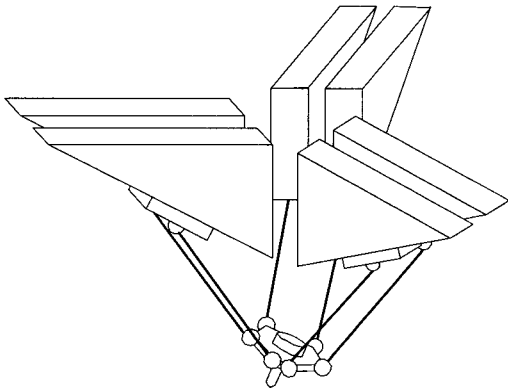


Fig. 1 Schematic of HSM

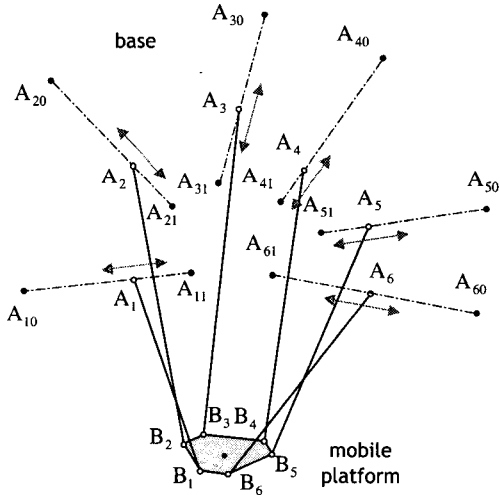


Fig. 2 geometric parameters of HSM

3. 캘리브레이션 장치와 방법

완전 자동의 self-calibration을 수행하기 위해서는 여분의 센서를 통한 정보가 필요하게 되는 데 제한된 캘리브레이션 방법에서는 일정 길이의 구속 링크장치를 사용하여 6 개의 구동기를 가지고 5 자유도의 병렬기구를 구동할 수 있으므로 self-calibration을 수행하기 위한 한 개의 여분 정보를 얻을 수 있다. 이 절에서는 캘리브레이션 장치와 방법에 대해서 설명한다.

3.1 캘리브레이션 장치

캘리브레이션 장치는 양 끝에 구형 조인트를 가진 일정 길이의 링크로 구성되어 있다. 이 링크의 양단을 각각 base 와 플랫폼에 고정시키기 위해 double ball bar system에서 사용되어진 Mounting sockets 이나 magnetic cup을 필요로 한다. Fig 3은 구속링크의 구성을 보여준다.



Fig. 3 Schematic of the constraint link

구속링크는 Fig 4에서와 같이 병렬기구의 안쪽이나 바깥 쪽에 설치될 수 있다. 그러나, 바깥 쪽에 설치하는 경우에는 mobile platform의 회전 범위가 더 많이 제한되어서 충분한 orientation 작업공간을 얻을 수가 없으므로 기구의 안쪽에 설치하는 것이 바람직하다.

3.2 기준 좌표계와 기구교정변수

기준 좌표계를 설정하는 방법에 따라서 캘리브레이션되어야 할 기구교정변수(identification parameter)의 수가 결정된다. 그러므로, 캘리브레이션을 효율적으로 수행하기 위한 최적의 기준 좌표계의 선택은 중요하다.

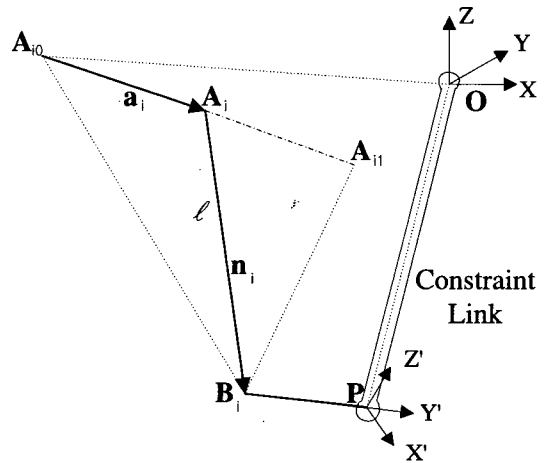


Fig. 4 Vector diagram for a kinematic chain of HSM

본 논문에서는 Fig 4에서와 같이 구속링크의 한 쪽 끝에 있는 구형 조인트의 중심점 O 에 기준좌표계를 위치시킨다. global Z 축은 음의 중력방향을 취하며 global X,Y 축은 점 A₀ 가 이루는 평면에 평행하다. 플랫폼의 중심은 구속링크의 다른 한쪽에 있는 구형 조인트의 중심인 점 P 이며 초기에 두 좌표계는 동일한 방향을 취한다. 이 경우 점 O 와 점 P 는 기구고정변수로 고려되지 않는다.

다음은 한개의 kinematic chain 에서 서로 독립적이며 그 수가 최소인 기구고정변수들이다.

- (i) 구형 조인트의 위치 **B** 3 parameters/chain
 - (ii) 슬라이더 축의 시작점 **A₀** 3 parameters/chain
 - (iii) 슬라이더 축의 각도 α, β 3 parameters/chain
 - (iv) 링크 길이 l 1 parameters/chain
- 그러므로 각 chain 마다 9 개의 변수를 가지므로 총 54 개의 변수들이 있다. 여기서 **B** 점은 PX'Y'Z' 축에 대해 표현된 반면에 **A₀** 점은 OXYZ 축에 대해 표현 되어졌다.

3.3 측정 데이터

구속링크로 인한 구속때문에 첨단부 P 점의 운동은 구속링크의 길이를 반지름으로 하는 구형 표면에서만 가능하다. 그러나 첨단부 방위는 P 점을 중심으로 다양한 값을 가질 수가 있다. 캘리브레이션에 사용되어질 데이터들은 이 구형 표면에 존재하는 불연속적인 점들로써 한 점에 대해 여러 값의 방위값을 취하게 되며 더 좋은 캘리브레이션 결과를 얻기 위해서는 더 넓은 범위의 방위값을 취하는 것이 바람직 하다.

3.4 캘리브레이션 방법

완전자동적 캘리브레이션을 수행하기 위해서는 구동되지 않는 한 개의 구동기가 캘리브레이션에 필요한 데이터를 얻도록 설정이 되어야 한다. 캘리브레이션을 수행하는 방법에는 아래와 같이 역기구학을 이용하거나 순기구학을 이용하는 방법이 있다.

3.4.1 역기구학 방법

역기구학 문제는 기구 플랫폼의 자세(위치와 방위)로부터 구동기의 관절 변수 값을 계산하며 HSM 의 경우 각각의 kinematic chain 마다 간단하면서 유일한 해를 얻을 수가 있다. Fig 4 에서 하나의 kinematic chain 을 고려한다면 역기구학식은 다음과

같이 나타낼 수가 있다.

$$\lambda = \mathbf{a}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{B} - \sqrt{\ell^2 - \|\mathbf{A}_0 \mathbf{B}\|^2 + (\mathbf{a}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{B})^2} \quad (1)$$

여기서 **a** 는 구동기의 레일방향에 단위 벡터이다. $\mathbf{v}_1 \equiv \mathbf{a}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{B}$, $\mathbf{v}_2 \equiv \|\mathbf{A}_0 \mathbf{B}\|^2$ 라고 하면 식(1)은 다음과 같이 간단하게 표현되어 진다.

$$\lambda = \mathbf{v}_1 - \sqrt{\ell^2 - \mathbf{v}_2 + \mathbf{v}_1^2} \quad (2)$$

식(2)는 각각 기구고정 변수로 표현되어 질 수 있다. 단위 벡터 **a** 는 두개의 각도 α 와 β 로 다음과 같이 표현되어진다.

$$\mathbf{a} = [\mathbf{C}\alpha\mathbf{C}\beta \quad \mathbf{S}\alpha\mathbf{C}\beta \quad \mathbf{S}\beta]^T \quad (3)$$

이 식에서 C 와 S 는 각각 Cosine 함수와 Sine 함수를 나타낸다. 다른 변수들은 또한 다음과 같다

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} a_{0x} & a_{0y} & a_{0z} \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_x & b_y & b_z \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

윗 식에서 위치 벡터 **B** 는 기구의 mobile 플랫폼에 대해 표현되어 졌다. 위의 식들을 가지고 \mathbf{v}_1 과 \mathbf{v}_2 를 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{v}_1 = t_x \mathbf{C}\alpha\mathbf{C}\beta + t_y \mathbf{S}\alpha\mathbf{C}\beta + t_z \mathbf{S}\beta \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_2 = t_x^2 + t_y^2 + t_z^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} t_x &\equiv p_x - a_x + r_{11}b_x + r_{12}b_y + r_{13}b_z \\ t_y &\equiv p_y - a_y + r_{21}b_x + r_{22}b_y + r_{23}b_z \\ t_z &\equiv p_z - a_z + r_{31}b_x + r_{32}b_y + r_{33}b_z \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로 식(2)는 다음과 같이 기구고정 변수의 항으로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = t_x \mathbf{C}\alpha\mathbf{C}\beta + t_y \mathbf{S}\alpha\mathbf{C}\beta + t_z \mathbf{S}\beta - e_1 \quad (8)$$

$$e_1 = \sqrt{\ell^2 - t_x^2 - t_y^2 - t_z^2 + (t_x \mathbf{C}\alpha\mathbf{C}\beta + t_y \mathbf{S}\alpha\mathbf{C}\beta + t_z \mathbf{S}\beta)^2} \quad (9)$$

역기구학 캘리브레이션에서는 역기구학식으로부터 계산되어진 수동 관절변수 λ_c 와 측정된 수동관절변수 λ_m 과의 차이를 오차 $d\lambda$ 로 정의하고 이를 최소화시키는 방법을 사용한다. $d\lambda$ 는 또한 역기구학식에서 유도된 Identification Jacobian 으로 캘리브레이션 기구변수들과 관계되어진다.

Identification Jacobian 은 식(8)에 표현된 역기구

학식을 각각의 기구변수에 대하여 미분을 취함으로써 얻어 진다.

$$d\lambda = \mathbf{J} du \quad (10)$$

임의의 chain 에 대해 역기구학식은 일반적으로 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$\lambda = \lambda(\mathbf{P}, \mathbf{R}, \mathbf{u}) \quad (11)$$

이 식에서 \mathbf{u} 는 9 개의 기구교정 변수를 나타내는 벡터이다. 식(11)을 기구교정 변수에 대해 미분하면

$$d\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda(\mathbf{P}, \mathbf{R}, \mathbf{u})}{\partial u_i} du_i \quad (12)$$

식(12)에서 n 은 기구교정 변수의 수를 나타내고 이 때 Identification Jacobian 은 다음과 같다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial b_x} & \frac{\partial \lambda}{\partial b_y} & \frac{\partial \lambda}{\partial b_z} & \frac{\partial \lambda}{\partial a_x} & \frac{\partial \lambda}{\partial a_y} & \frac{\partial \lambda}{\partial a_z} & \frac{\partial \lambda}{\partial \ell} & \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} & \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} \end{bmatrix}$$

캘리브레이션 알고리즘은 위의 Identification Jacobian 을 가지고 각각의 chain 에 대하여 독립적으로 다음과 같이 수행될 수 있다.

- (i) Select a passive actuator
- (ii) Execute a trajectory and measure $\hat{\lambda}_m$ for all the actuators including the passive actuator
- (iii) Solve kinematics with nominal values to get computed articular variable λ_c for the passive actuator
- (iv) Calculate $d\lambda = \hat{\lambda}_m - \lambda_c$
- (v) Check if $d\lambda < \epsilon$ stop and proceed for next chain
- (vi) Otherwise compute Identification Jacobian
- (vii) Compute $du = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T d\lambda$
- (viii) Update $\mathbf{u} = \mathbf{u} + du$
- (ix) Go to step (ii)

위의 단계(iii)에서는 다섯 개의 구동기 관절변수 값과 한 개의 구속링크길이를 가지고 순기구학식으로 플랫폼의 자세(위치와 방위)를 계산한 후 역기구학식으로 수동구동기의 관절변수를 계산한다. 이러한 순기구학 해를 구하기 위해서는 비선형 순기구학식을 풀어야만 하는데 MATRAB 의 optimization toolbox 에서 제공하는 *fsolve()* 함수를 사용하거나, 혹은 Newton 방법을 사용할 수 있는데 후자가 더 빠른 수렴속도를 나타낸다.

3.4.2 순기구학 방법

순기구학은 구동기의 관절변수 값으로부터 플랫폼의 자세값을 계산한다. 역기구학과는 달리 순기구학은 유일한 해를 얻기가 힘들다. HSM의 순기구학 해는 다음과 같은 방법으로 수치적으로 얻어질 수 있다.^[17]

- (i) Suppose \mathbf{X}_g , an initial posture (6x1 vector)
- (ii) Calculate $\mathbf{Q}_g = \mathbf{IK}(\mathbf{X}_g)$
- (iii) Update posture as: $\mathbf{X}_g = \mathbf{X}_g + \mathbf{J}_{inv}^{-1}(\mathbf{Q}_g - \mathbf{Q}_d)$
- (iv) Calculate $\mathbf{Q}_g = \mathbf{IK}(\mathbf{X}_g)$
- (v) If $\|\mathbf{Q}_d - \mathbf{Q}_g\| > \text{tolerance}$, goto step (iii)
- (vi) else \mathbf{X}_g is the forward kinematics solution

위에서 \mathbf{Q}_d 는 측정된 구동관절변수 값이고 \mathbf{Q}_g 는 역기구학식으로부터 계산된 관절변수 값이다. \mathbf{J}_{inv} 는 Jacobian 의 역행렬이고 \mathbf{X}_g 는 플랫폼의 주어진 자세이다. 위의 Jacobian 의 역행렬은 Euler angle 로 표현되어야 한다.

순기구학을 이용한 캘리브레이션 방법에서는 플랫폼의 주어진 여러 자세로부터 계산되어진 구속링크의 길이사이의 차이값을 cost function으로 정의한다. 그 이유는 구속링크의 길이가 일정하므로 계산되어진 구속링크 길이는 항상 동일해야 하기 때문이다. 최적화하는 방법에는 Levenberg-Marquardt method 와 같은 알고리즘을 사용하거나 구속링크 길이에 대한 Identification Jacobian 을 계산하여 최적화시키는 방법이 있다. 구속링크 길이를 계산하기 위해서는 순기구학식을 풀어야 하며 Identification Jacobian 은 수치적인 방법으로 계산된다. 이러한 접근 방법은 Ota 등^[4]이 사용하였다. 계산되어질 Identification Jacobian 은 다음과 같다.

$$d\hat{p} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial u_i} du_i \quad (13)$$

여기서 $\hat{p} = g(\lambda, \mathbf{u})$ 는 구속링크의 길이를 나타낸다. 순기구학식을 이용하는 캘리브레이션 알고리즘의 경우 역기구학식을 이용하는 알고리즘에 비해 훨씬 많은 시간이 걸린다.

4. 시뮬레이션 및 결과

앞에서 제안되어진 캘리브레이션 알고리즘의 유효성을 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 정확한 기구변수 값과 오차를 포함한 기구변수 값이 사용되었으며 캘리브레이션이 수행되면서 오차를 포함한 기구변수 값은 cost function의 값을 줄이면서 정확한 값으로 수렴해야 한다.

캘리브레이션 성능의 평가 기준은 기구 첨단부의 위치와 방위의 정확도를 가지고 판단되며 이 정확도는 기구의 전체 작업공간내에서 변하기 때문에 첨단부의 중심으로부터 0.1x0.1x0.1m³의 부피를 갖는 작업공간에 대해 정확도의 평균값을 구하였다.

또한, 시뮬레이션시 측정데이터에 대한 잡음과 링크길이의 부정확성을 고려하였다.

Table 1은 위치와 방위에 대한 초기 오차 및 기구교정 변수들에 대한 오차를 보여주고 있다. 길이는 meter 단위이고 각도는 radian 단위이다. Table 2는 측정데이터 잡음이 전혀 없는 경우 역기구학식을 이용한 캘리브레이션 알고리즘의 시뮬레이션 결과이다. 이 경우 아주 정확한 기구보정이 될수 있음을 보여준다. Fig 5는 측정 잡음에 따른 오차 값을 보여주며 Fig 6에서는 구속링크 길이의 부정확성 때문에 생기는 오차를 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이 캘리브레이션의 정확도는 센서와 구속링크 길이의 정밀도에 의존하며 위치 및 방위에 대한 오차는 측정 잡음과 링크의 부정확성에 대한 오차크기와 비슷하다.

Table 1 Initial Errors

Position : 8.0E-3		Orientation : 1.4E-2				
chain #	1	2	3	4	5	6
ℓ	1.9E-3	1.8E-3	1.6E-3	-0.5E-3	-0.1E-3	-0.3E-3
b_x	-1.1E-3	-1.2E-3	-1.2E-3	1.3E-3	1.9E-3	1.6E-3
b_y	-1.9E-3	1.2E-3	1.4E-3	1.3E-3	1.7E-3	-1.9E-3
b_z	3.8E-3	3.9E-3	3.9E-3	3.8E-3	4.0E-3	3.7E-3
a_{0x}	-1.9E-3	-2.0E-3	-1.4E-3	1.3E-3	-1.8E-3	-1.4E-3
a_{0y}	-1.8E-3	1.1E-3	-0.8E-3	-2.6E-3	-0.6E-3	-1.4E-3
a_{0z}	-1.5E-3	-0.2E-3	-1.7E-3	-1.4E-3	1.1E-3	-1.3E-3
α	2.4E-2	2.4E-2	-7.0E-2	-7.0E-2	1.8E-2	1.8E-2
β	-2.4E-2	-2.4E-2	-2.4E-2	-2.4E-2	-2.4E-2	-2.4E-2

Table 2 Errors without noises

Position : 3.8E-16		Orientation : 1.7E-15				
cahin #	1	2	3	4	5	6
ℓ	-1.2E-15	-3.3E-16	-3.3E-16	-1.3E-15	-1.1E-16	2.2E-16
b_x	-2.7E-17	2.7E-17	1.4E-17	0.0	5.5E-17	8.3E-17
b_y	0.0	-1.0E-17	-8.3E-17	0.0	1.4E-17	-1.1E-16
b_z	2.7E-17	5.5E-17	-8.3E-17	-1.4E-16	-5.5E-17	5.5E-17
a_{0x}	4.4E-16	1.1E-16	0.4E-16	-1.2E-16	1.1E-16	3.3E-16
a_{0y}	2.2E-16	-0.5E-16	-1.1E-16	-3.3E-16	0.0	-3.3E-16
a_{0z}	-1.0E-15	-3.3E-16	-2.7E-16	-1.5E-15	-0.5E-16	1.6E-16
α	2.2E-16	2.2E-16	0.0	2.2E-16	0.0	0.0
β	-7.7E-16	2.2E-16	-4.4E-16	-4.4E-16	-2.2E-16	0.0

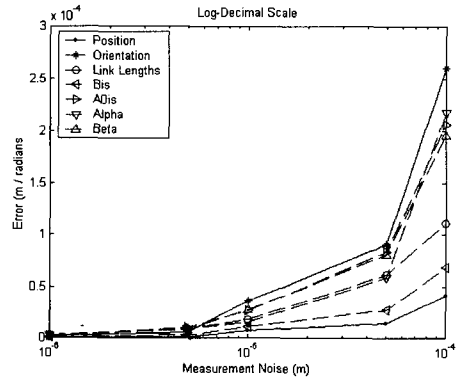


Fig. 5 Effects of measurement noise

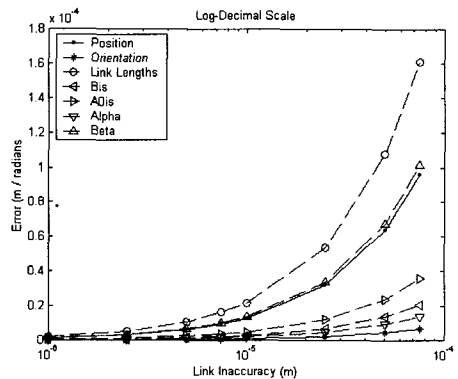


Fig. 6 Effects of link inaccuracy

5. 결론

본 논문에서는 완전 자동화된 새로운 캘리브레이션 알고리즘을 소개하였다. 제안된 캘리브레이션

이선 방법은 기구의 첨단부를 구속하기 위해 양 끝이 구형 조인트로 이루어진 고정길이의 링크를 사용하였다. 이번에 제안된 알고리즘은 기구 구조에 변형을 일으킬 수 있는 조인트를 구속시키는 기존의 방법과는 달리 구속장치를 쉽게 설치할 수 있는 장점이 있다. 역기구학식과 순기구학식을 이용한 두개의 캘리브레이션 알고리즘이 연구되었으며 컴퓨터 시뮬레이션 결과 역기구학식을 이용한 캘리브레이션 알고리즘이 빨리 수렴함을 알 수 있었다. 하지만, 역기구학식을 이용한 정확한 캘리브레이션을 하기 위해서는 구속링크의 길이를 정확하게 알아야만 한다. 반면에 순기구학식을 이용하는 경우에는 정확한 구속링크의 길이를 요구하지는 않는다. 앞으로 실제 실험에 의한 결과의 검증에 대해 연구할 예정이다.

참고문헌

- Zhuang H., Yan J., and Masory O., "Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals," *Journal of Robotic Systems* 15(7), 1998.
- Nahvi, A., Hollerbach J. M., and Hayward V., "Calibration of parallel robot using multiple kinematic closed loops," pp. 407-412, IEEE 1994.
- Maurine P., and Dombre E., "A calibration procedure for the parallel robot Delta 4," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 975-980, 1996.
- Ota, H., Shibukawa, T., Tooyama, T. and Uchiyama, M., "Forward kinematic calibration method for parallel mechanism using pose data measured by a double ball bar system," *Proceedings of the Year 2000 Parallel Kinematic Machines International Conference*, pp. 57-62, September 2000.
- Besnard S., and Khalil W., "Calibration of parallel robots using two inclinometers," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999.
- Notash, L. and Podhorodeski, R. P., "Fixtureless calibration of parallel manipulators," *Transactions of the ASME*, Vol. 21 No. 3, pp. 273-294, 1997.
- Bennet, D. J. and Hollerbach, J. M., "Autonomous calibration of single loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 5, pp. 597-606, October 1991.
- Iurascu, C. C. and Park, F. C., "Geometric algorithm for parallel mechanism machine tool," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1752-1757, May 1999.
- Zhuang H. and Liu L., "Self-Calibration of a class of Parallel Manipulators," *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 994-999, 1996.
- Zhuang H., "Self-calibration of parallel mechanisms with a case study on Stewart platforms," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 3, pp. 387-397, 1997.
- C. W. Wampler, J. M. Hollerbach, and T. Arai, "An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 5, pp. 710-724, Oct 1995.
- W. Khalil and S. Besnard, "Self calibration of Stewart-Gough parallel robots without extra sensors," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1116-1121, Dec 1999.
- Maurine, P., Abe, K. and Uchiyama, M., "Towards more accurate parallel robots" *IMEKO-XV World Congress, Osaka, Japan, Volume X (1999/6/13-18)*, 73-80.
- Maurine, P., Uchiyama, M., and Abe, K. "A fully-autonomous procedure for kinematic calibration of HEXA parallel robots," *Proceedings of 1998 China-Japan Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering, Huangshan City, P. R. China, (1998/10/5-10)*, 161-166.
- Maurine, P., Liu. D. M. and Uchiyama, M., "Self Calibration of a new HEXA parallel robot," *Proceedings of the 4th JAPAN-FRANCE CONGRESS & 2nd ASIA-EUROPE CONGRESS on MECHATRONICS, Kitakyushu, Japan*, pp. 290-295 October 1998.
- Meggiolaro M. A., Scriffignano G., and Dubowsky S., "Manipulator calibration using a single end-point contact constraint," *Proceedings of DETC 2000, ASME, Sep. 10-14, DETC2000/MECH-14129, Baltimore, MD, 2000.*
- Merlet, J-P., *Les robots paralleles*, 2nd ed., Hermes, Paris, 1997.