

3 자유도델타형병렬로봇의 동력학적모형에 대한 파라메터동정

김유범, 공영수

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《공장에서 제품의 가지수와 생산량을 늘이고 질을 높이기 위한 중요한 방도는 생산 공정의 자동화, 무인화, 다기능화를 실현하고 통합생산체계를 확립하여 공장을 수자화된 공장으로 만드는데 있습니다.》

전통적인 직렬로봇에 비하여 병렬로봇은 세기 대 중량비가 높고 동작속도가 빠르며 환경적응능력이 강하고 투자 대 성능비가 높은것 등의 많은 우점들을 가지고있는것으로 하여 세계적으로 광범히 연구도입되고있다.

특히 전자공업과 경공업, 식료공업, 의약품공업 등 여러 부문에서는 제품의 조립, 포장, 입상, 선별 등과 같이 다량의 고속 및 반복조작이 필요하며 이러한 생산공정들의 자동화, 지능화, 무인화를 실현하는데서 델타형병렬로봇의 고속 및 고정밀조종체계의 개발은 필수적인 수단으로 되고있다. 이러한 조종체계를 설계하기 위한 선결조건은 대상의 동력학적모형을 정확히 동정하는것이다.

선행연구[1, 3, 4]에서는 델타형병렬로봇의 운동학적모형과 동력학적모형을 얻어내고 그것의 파라메터들은 측정의 방법으로 근사적으로 결정하였으며 대상의 모형파라메터를 정확히 추정하기 위한 구체적인 동정방법에 대하여 고찰하지 못하였다.

이로부터 논문에서는 델타형병렬로봇의 입출력측정자료에 차차최소2제곱법[2]을 적용하여 로봇의 동력학적모형파라메터들을 동정하기 위한 한가지 수법을 제안하고 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형에 의한 동정결과에 대한 해석을 통하여 그 효과성을 검증하였다.

1. 델타형병렬로봇의 동력학적모형과 그 파라메터에 대한 동정

1) 델타형병렬로봇의 동력학적모형

델타형병렬로봇은 3개의 닫힌운동학적인쇄들과 고정판, 가동판으로 구성된 3자유도 로봇이다.

그림 1에 대상으로 하는 3자유도델타형병렬로봇의 기구학적구성과 자리표계설정, 기하학적파라메터들에 대하여 보여주었다.

델타로봇의 해석적인 동력학적모형은 다음과 같은 라그랑주-오일러방정식을 리용하여 얻어낼수 있다.

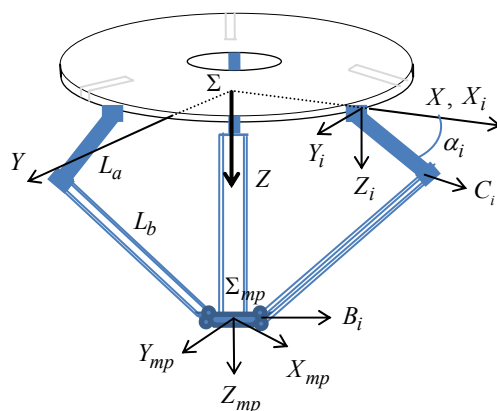


그림 1. 3자유도델타형병렬로봇의 기구학적
구성과 자리표계설정, 기하학적파라메터

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_j} \right) - \frac{dL}{dq_j} = Q_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{df_i}{dq_j}, \quad j=1, \dots, n \quad (1)$$

여기서 i 는 속박의 첨수, k 는 속박의 개수, j 는 일반화자리표의 첨수, n 은 일반화자리표의 개수, L 은 라그랑주함수, q_j 는 j 번째 일반화자리표, λ_i 는 라그랑주승수, f_i 는 운동학적속박방정식, Q_j 는 $Q_j = \hat{Q}_j + \tau_i$ 로 정의된 일반화힘(외부작용힘)이다. 그리고 \hat{Q}_j 은 가동관에 작용하는 일반화외부힘, τ_i 는 구동관절 i 에 작용하는 톨음모멘트이다.

델타로봇의 매 토막들과 가동관의 운동에너지와 포텐셜에너지를, 속박방정식들을 고려하여 대입하고 정리하면 동력학적모형은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \left(I_m + \frac{1}{3} m_a L_a^2 + m_b L_a^2 \right) \ddot{\alpha}_1 + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) L_a g \cos(\alpha_1) - \\ &\quad - 2\lambda_1 [(x \cos(\phi_1) + y \sin(\phi_1) + R - r) \sin(\alpha_1) - z \cos(\alpha_1)] \\ \tau_2 &= \left(I_m + \frac{1}{3} m_a L_a^2 + m_b L_a^2 \right) \ddot{\alpha}_2 + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) L_a g \cos(\alpha_2) - \\ &\quad - 2\lambda_2 [(x \cos(\phi_2) + y \sin(\phi_2) + R - r) \sin(\alpha_2) - z \cos(\alpha_2)] \\ \tau_3 &= \left(I_m + \frac{1}{3} m_a L_a^2 + m_b L_a^2 \right) \ddot{\alpha}_3 + \left(\frac{1}{2} m_a + m_b \right) L_a g \cos(\alpha_3) - \\ &\quad - 2\lambda_3 [(x \cos(\phi_3) + y \sin(\phi_3) + R - r) \sin(\alpha_3) - z \cos(\alpha_3)] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 I_m 은 델타로봇의 전동기의 관성모멘트, m_a 는 주동팔의 질량, m_b 는 종동팔의 질량, L_a 는 주동팔의 길이, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 은 구동관절들의 회전각, (x, y, z) 는 가동관의 공간위치, g 는 중력가속도이다. 또한 $\phi_1 = 0^\circ$, $\phi_2 = 120^\circ$, $\phi_3 = 240^\circ$ 이다.

2) 동력학적모형의 파라미터동정

논문에서는 식 (2)의 모형구조에 대하여 축차최소2제곱(RLS)알고리즘을 리용하여 모형의 파라미터들을 동정한다. 이때 대상의 입출력측정자료는 ADAMS/MATLAB의 협동모의모형을 통하여 얻어낸다.

RLS알고리즘에서는 다음식과 같이 정의되는 선형회귀방정식을 리용한다.

$$y(k) = \varphi(k)^T \theta \quad (3)$$

여기서 $y(k)$ 는 출력측정벡토르, $\varphi(k)$ 는 측정값들과 그것의 함수들로 구성된 회귀행렬, θ 는 추정해야 할 파라미터벡토르이다.

이때 체계로부터 얻어진 표본값 즉 우리의 경우에는 로봇의 관절위치와 속도, 가속도 및 관절구동모멘트들의 측정표본값들을 RLS알고리즘에 적용하여 모형파라미터들을 추정할 수 있다.

RLS알고리즘은 다음식과 같이 구성된다.[2]

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k-1)\varphi(k)(I + \varphi(k)^T P(k-1)\varphi(k))^{-1} e(k) \quad (4)$$

$$P(k) = P(k-1) - P(k-1)\varphi(k)(I + \varphi(k)^T P(k-1)\varphi(k))^{-1} \varphi(k)^T P(k-1) \quad (5)$$

$$e(k) = y(k) - \varphi(k)^T \hat{\theta}(k-1) \quad (6)$$

여기서 $\hat{\theta}(k)$ 은 k 번째 시각에 추정되는 파라미터벡토르, $e(k)$ 는 k 번째 시각의 예측오차(추정오차), $P(k)$ 는 공분산행렬, I 는 단위행렬이다.

다음으로 파라미터의 동정을 위하여 중요한것은 로봇의 동정용궤도를 잘 설정하는 것이다.

델타로봇에서의 궤도계획은 로봇의 가동판이 작업공간의 초기점으로부터 마감점까지 주어진 속도와 가속도로 이동하는 작업공간에서의 경로를 생성하는 과정이다. 이러한 궤도들은 전동기의 물리적제약특성과 그리고 궤도의 원활성(미분가능성)과 정밀성 등과 같은 질적지표에 근거하여 선택된다.

델타로봇에서는 6차-1차-6차다항식을 리용하여 구간별궤도계획을 실현한다.

보통 가속구간, 등속도구간, 감속구간과 같은 3개의 구간으로 구성된다.

일정한 경계조건들에 의하여 매 궤도계획구간들을 연결하며 이때 위치, 속도, 가속도, 가가속도곡선들이 연속이고 미분가능하여야 한다. 가속구간에서는 전동기가 가속하는 시간동안 6차다항식을 리용하며 등속구간에서는 1차다항식, 감속구간에서는 전동기가 감속하는 시간동안 6차다항식을 리용한다.

론문에서는 작업공간에서 초기위치와 마감위치를 접수하고 그 두 점사이에 공간궤도를 형성하는 중간점들을 직선으로 연결하면서 통과하도록 경로를 생성한다. 매 중간점들에 대한 대응하는 관절위치각은 델타로봇의 역운동학모형을 리용하여 구할수 있다.

표 1에 델타로봇의 동정용궤도와 모형검증용궤도를, 그림 2에 작업공간에서 동정용궤도 T_1 과 검증용궤도 T_2 의 자리길을 보여주었다.

표 1. 델타로봇의 동정용궤도와 모형검증용궤도

	동정용궤도(T_1)/m	검증용궤도(T_2)/m
시작점(starting point)	(0, 0, 0.62)	(0, 0, 0.62)
경로점(way points)	(0, 0, 0.8), (0.1, 0, 0.8),	(0, 0, 0.8), (0.1, 0, 0.8),
	(0, 0.1, 0.67), (0, -0.1, 0.67),	(0, 0, 0.8), (0, 0.07, 0.8),
	(0.1, 0, 0.8), (0, 0, 0.8)	(0, 0, 0.8)
마감점(final point)	(0, 0, 0.62)	(0, 0, 0.62)

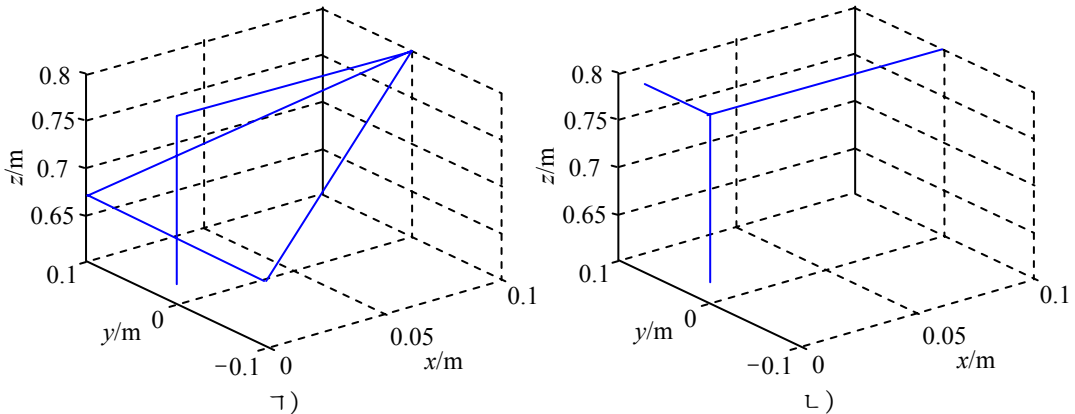


그림 2. 동정용궤도 T_1 (τ)과 검증용궤도 T_2 (ι)의 자리길

다음으로 파라미터동정수법을 적용하기 위하여 식 (2)의 모형을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\tau_1 = \theta_1 \ddot{\alpha}_1 - \theta_2 x \sin(\alpha_1) - \theta_3 y \sin(\alpha_1) + \theta_4 z \cos(\alpha_1) + \theta_5 \cos(\alpha_1) + \theta_6 \sin(\alpha_1)$$

$$\begin{aligned}\tau_2 &= \theta_1 \ddot{\alpha}_2 - \theta_7 x \sin(\alpha_2) - \theta_8 y \sin(\alpha_2) + \theta_9 z \cos(\alpha_2) + \theta_5 \cos(\alpha_2) + \theta_{10} \sin(\alpha_2) \\ \tau_3 &= \theta_1 \ddot{\alpha}_3 - \theta_{11} x \sin(\alpha_3) - \theta_{12} y \sin(\alpha_3) + \theta_{13} z \cos(\alpha_3) + \theta_5 \cos(\alpha_3) + \theta_{14} \sin(\alpha_3)\end{aligned}\quad (7)$$

여기서 $\theta_1 = I_m + (1/3)m_a L_a^2 + m_b L_b^2$, $\theta_2 = 2\lambda_1 \cos(\phi_1)$, $\theta_3 = 2\lambda_1 \sin(\phi_1)$, $\theta_4 = 2\lambda_1$,
 $\theta_5 = ((1/2)m_a + m_b)L_a g$, $\theta_6 = 2\lambda_1(r-R)$, $\theta_7 = 2\lambda_2 \cos(\phi_2)$, $\theta_8 = 2\lambda_2 \sin(\phi_2)$,
 $\theta_9 = 2\lambda_2$, $\theta_{10} = 2\lambda_2(r-R)$, $\theta_{11} = 2\lambda_3 \cos(\phi_3)$, $\theta_{12} = 2\lambda_3 \sin(\phi_3)$,
 $\theta_{13} = 2\lambda_3$, $\theta_{14} = 2\lambda_3(r-R)$

이다.

또한 식 (7)을 식 (3)과 같은 회귀형식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \varphi^T \theta = \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \varphi_{1,3} & \cdots & \varphi_{1,14} \\ \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \varphi_{2,3} & \cdots & \varphi_{2,14} \\ \varphi_{3,1} & \varphi_{3,2} & \varphi_{3,3} & \cdots & \varphi_{3,14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{14} \end{bmatrix}\quad (8)$$

여기서

$$\begin{array}{lll} \varphi_{1,1} = \ddot{\alpha}_1 & \varphi_{2,1} = \ddot{\alpha}_2 & \varphi_{3,1} = \ddot{\alpha}_3 \\ \varphi_{1,2} = -x \sin(\alpha_1) & \varphi_{2,5} = \cos(\alpha_2) & \varphi_{3,5} = \cos(\alpha_3) \\ \varphi_{1,3} = -y \sin(\alpha_1) & \varphi_{2,7} = -x \sin(\alpha_2) & \varphi_{3,11} = -x \sin(\alpha_3) \\ \varphi_{1,4} = z \cos(\alpha_1) & \varphi_{2,8} = -y \sin(\alpha_2) & \varphi_{3,12} = -y \sin(\alpha_3) \\ \varphi_{1,5} = \cos(\alpha_1) & \varphi_{2,9} = z \cos(\alpha_2) & \varphi_{3,13} = z \cos(\alpha_3) \\ \varphi_{1,6} = \sin(\alpha_1) & \varphi_{2,10} = \sin(\alpha_2) & \varphi_{3,14} = \sin(\alpha_3) \\ \varphi_{1,7} = \varphi_{1,8} = 0 & \varphi_{2,2} = \varphi_{2,3} = 0 & \varphi_{3,2} = \varphi_{3,3} = 0 \\ \varphi_{1,9} = \varphi_{1,10} = 0 & \varphi_{2,4} = \varphi_{2,6} = 0 & \varphi_{3,4} = \varphi_{3,6} = 0 \\ \varphi_{1,11} = \varphi_{1,12} = 0 & \varphi_{2,11} = \varphi_{2,12} = 0 & \varphi_{3,7} = \varphi_{3,8} = 0 \\ \varphi_{1,13} = \varphi_{1,14} = 0 & \varphi_{2,13} = \varphi_{2,14} = 0 & \varphi_{3,9} = \varphi_{3,10} = 0 \end{array}$$

이다.

이 회귀모형은 관절가속도와 관절위치, 가동판의 공간위치, 구동관절에 작용하는 톨음모멘트를 입력(측정자료)으로 이용한다. 이 측정정보들은 동정용궤도를 따라 이동하는 동안에 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형으로부터 얻어진다.

식 (8)로 주어진 회귀모형을 식 (3)에 귀착시키고 식 (4)–(6)으로 표시된 RLS알고리즘을 이용하여 동력학적모형의 파라미터 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{14}]^T$ 를 추정한다.

2. 파라미터동정결과 및 검증결과해석

동정용입출력자료를 얻기 위하여 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형을 이용한다.

모형의 가동판을 동정용궤도 T_1 을 따라 이동시킨다. 이때 가동판의 공간위치 (x, y, z) , 관절위치 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 에 대한 자료들을 측정한다. 그런데 식 (2) 혹은 식 (7)에서 보는바와 같이 해석적동력학모형에는 관절가속도 $(\ddot{\alpha}_1, \ddot{\alpha}_2, \ddot{\alpha}_3)$ 가 포함되어있다. 이 관절가속도값들은 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형으로부터 얻어진 관절위치값들을 수 값미분하여 얻는다.

협동모의모형으로부터 측정 한 자료들과 식 (4)–(6)에서 정의된 RLS알고리즘을 리용하여 얻은 델타로봇의 해석적동력학모형의 파라미터추정결과를 표 2에 보여주었다.

표 2. 델타로봇의 해석적동력학모형의 파라미터추정결과

파라메터	추정값	파라메터	추정값
θ_1	0.906 0	θ_8	6.291 8
θ_2	46.087 2	θ_9	-17.511 9
θ_3	0.653 0	θ_{10}	1.037 2
θ_4	-17.538 7	θ_{11}	-11.086 7
θ_5	23.589 0	θ_{12}	-16.297 8
θ_6	0.837 0	θ_{13}	-17.154 5
θ_7	-8.811 9	θ_{14}	0.405 4

다음으로 델타로봇의 해석적동력학모형의 파라미터동정결과를 검증하기 위하여 MATLAB/Simulink 환경에서 동정한 파라메터값들을 리용하여 동력학모형(동정결과모형)을 구축하고 우에서 언급한 자료들을 입력으로 하여 매 관절에 작용하는 톨음모멘트 τ_i 를 출력한다. 이것은 동정결과모형의 예측출력에 대응한다. 이 예측출력과 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형으로부터 측정 한 톨음모멘트(즉 대상의 측정출력)를 비교한다.

이 두 모멘트사이의 차를 평가하기 위하여 다음식으로 정의되는 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error)를 성능평가지표로 리용한다.

$$\text{NRMSE} = 1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \text{mean}(y)\|} \quad (9)$$

여기서 \hat{y} 은 동정결과모형의 예측출력으로서 여기서는 Simulink환경에 구축한 모형의 출력값(매 관절의 톨음모멘트)에 대응한다. y 는 실제대상의 측정출력으로서 여기서는 협동모의모형의 출력인 관절톨음모멘트에 대응한다. 그리고 $\text{mean}(y)$ 는 y 의 평균값을 표시하며 $\|\cdot\|$ 는 벡토르의 2노름을 의미한다. 이때 벡토르의 요소개수는 측정점의 개수와 같다.

식 (9)에서 NRMSE가 1에 가까울수록 추정된 모형(동정결과모형)은 실제대상특성에 잘 정합된다고 말할수 있다. 그러나 NRMSE가 령에 가깝거나 령보다 작으면 추정모형은 잘 정합되지 않는다. 동정결과를 검증하기 위하여 델타로봇를 검증용궤도 T_2 에 적용하여 NRMSE를 구하였다.

표 3에 궤도 T_1 과 T_2 를 리용하였을 때 매 관절에 작용한 톨음모멘트의 NRMSE값들을 보여주었다.

표 3. 궤도 T_1 과 T_2 를 리용하였을 때 관절에 작용한 톨음모멘트의 NRMSE값

관 절	NRMSE(T_1)	MRMSE(T_2)
τ_1	0.852 8	0.856 7
τ_2	0.866 3	0.816 6
τ_3	0.915 3	0.914 0

표 3에서 보는바와 같이 궤도 T_1 과 T_2 를 리용하였을 때 델타로봇의 관절구동모멘트들의 NRMSE값은 0.8보다 크다. 이것은 해석적동력학모형의 추정된 파라메터들이 서로 다른 궤도들에 대한 델타로봇의 동특성에 80%이상의 적합도로 정합된다는것을 보여준다.

맺 는 말

3자유도델타형병렬로봇의 해석적동력학모형을 회귀모형구조로 변환하고 MSC-ADAMS/MATLAB협동모의모형의 입출력측정자료에 축차최소2제곱(RLS)알고리즘을 적용하여 로봇의 동력학적모형의 파라미터를 동정하고 그 결과를 검증하였다. 이 수법을 리용하면 델타형로봇을 구성하는 매 토막들의 관성모멘트와 질량에 대한 측정을 진행하지 않고도 동정을 통하여 조종체계설계에 필요한 로봇의 동력학적모형을 비교적 정확히 얻어낼수 있으므로 실천적으로 의의가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 전인철 등; 병렬로봇, 외국문도서출판사, 9~21, 주체106(2017).
- [2] 공영수, 김영춘; 체계모형화, 김일성종합대학출판사, 100~105, 주체108(2019).
- [3] X. Liu et al.; Mechanism and Machine Theory, 126, 155, 2018.
- [4] 徐东涛 等; 机床与液压, 45, 3, 43, 2017.

주체109(2020)년 5월 5일 원고접수

Parameter Identification for Dynamical Model of 3-DOF Delta Parallel Robot

Kim Yu Bom, Kong Yong Su

This paper have presents a method to identify the parameters of the dynamical model of delta parallel robot. The results of MSC-ADAMS/MATLAB co-simulation show that the proposed identification method is feasible and efficient in real applications.

Keywords: delta robot, parameter identification, dynamic model