한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1053-1061 October 2026 / 1053
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1053-1061 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00072
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

RLS 기반 구동기 추력상수 추정을 이용한 전방위 김발 시스템의 적응형 추력 분배

Adaptive Thrust Allocation for an Omnidirectional Gimbal System Using RLS-based Actuator Force Constant Estimation

박천규[1,#], 김정호[1], 최대규[1]
Cheonkyu Park[1,#], Jungho Kim[1], and Dae Gyu Choi[1]

1 한화시스템 기반기술연구소 (Hanwha Systems Infra Technology R&D Center)
Corresponding Author / E-mail: dothkyu@hanwha.com
ORCID: 0009-0008-4707-9779

KEYWORDS: Omnidirectional gimbal (전방위 김발), Adaptive thrust allocation (적응형 추력 분배), Recursive least squares (재귀적 최소자승법), Line-of-sight tracking (시선 추종)

Omnidirectional gimbal systems use multiple actuators to achieve the desired line-of-sight (LOS) motion through thrust allocation. However, actuator degradation caused by thermal effects or aging alters the force constants, leading to model mismatch and diminished torque realization performance. Conventional pseudoinverse-based thrust allocation assumes constant actuator characteristics and, therefore, cannot effectively compensate for these variations. This paper proposes an adaptive thrust allocation algorithm based on Recursive Least Squares (RLS) for omnidirectional gimbal systems. The proposed method estimates the force constant of each actuator in real-time using measured torque and actuator current data. These estimated force constants are incorporated into the thrust allocation process to address actuator degradation. Additionally, a weighted thrust allocation strategy redistributes current demand to alleviate the burden on degraded actuators while maintaining the required torque. The proposed algorithm was validated through MATLAB/Simulink simulations under conditions of asymmetric actuator degradation. Compared to the conventional pseudoinverse-based method, the proposed algorithm reduced the torque realization RMSE by 99% and the LOS tracking RMSE by 24.5%. Furthermore, the weighted thrust allocation decreased the RMS current of the most degraded actuator by 35.8%, all while preserving torque realization and LOS tracking performance, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Manuscript received: July 10, 2026 / Revised: August 20, 2026 / Accepted: September 4, 2026

NOMENCLATURE

l_d = Desired LOS Vector
l = Current LOS Vector
x = Attitude Angle Vector
τ_{cmd} = Command Torque Vector
τ_{real} = Actual Generated Torque Vector
I = Actuator Current Vector
K_t = Force Constant
$\hat{\Theta}$ = Estimated Force Constant Vector
W = Weighting Matrix
P = Covariance Matrix
λ = Forgetting Factor
H = Regression Matrix
J = Inertia Matrix
ω = Angular Velocity
B = Nominal Thrust Allocation Matrix
$B_W^{\dagger}$ = Weighted Pseudoinverse Allocation Matrix

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 유도무기 탐색기 및 무인 항공기(UAV) 기반 정찰 시스템에서는 플랫폼의 기동 및 외란 환경에서도 광학 탑재체의 안정적인 시선(Line-of-sight, LOS)을 유지하기 위한 김발(Gimbal) 시스템이 필수적으로 적용된다[1-4]. 김발 시스템은 EO/IR (Electro-optical/infrared) 센서의 자세를 안정화하여 장거리 표적 탐지 및 고해상도 영상 획득 성능을 확보하는 핵심 장치이다[5-7]. 고해상도 영상 획득과 장거리 탐지 성능을 만족하기 위해서는 대구경 광학계와 고성능 이미지 센서가 요구되며 이에 따라 광학 탑재체의 크기와 중량이 증가하게 된다. 따라서 제한된 탑재 공간 내에서 대형 광학 장비를 효율적으로 수용할 수 있는 김발 기구 설계 기술이 중요하다.

기존의 축 기반 김발 시스템은 일반적으로 안쪽 프레임과 바깥쪽 프레임을 직렬 회전축 구조로 연결하고 각 회전축 중심에 모터를 배치하여 독립적인 축 제어를 수행하는 방식을 사용한다[8-11]. 이러한 구조는 제어 관점에서 직관적이라는 장점이 있으나 프레임과 회전축 구동부가 탑재체 주변 및 중심 공간을 차지하므로 동일한 외경 조건에서 내부 광학 장비의 수용 공간이 제한된다. 또한 일반적인 2축 김발 구조는 시선 축을 중심으로 발생하는 영상 회전 성분을 직접 보상하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 롤 축을 추가하거나 디롤(Deroll) 광학계를 적용할 수 있으나 이 경우 시스템의 부피, 중량, 조립 복잡도가 증가하게 된다[12].

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 내부 회전축과 중앙 프레임을 제거하고 구동기를 김발 외곽에 분산 배치하는 전방위 김발 시스템이 고려될 수 있다[13]. 전방위 김발 시스템은 외곽에 배치된 복수의 구동기를 동시에 사용하여 내부 탑재체의 3축 자세를 제어하는 구조이다. 이 방식은 내부 공간 활용성을 높이고 대형 탑재체 수용에 유리하지만 물리적으로 독립된 개별 회전축이 존재하지 않는다. 따라서 탑재체의 요구 토크를 각 구동기의 입력으로 변환하는 추력 분배 알고리즘이 필수적이며 일반적으로 의사역행렬(Pseudo-inverse)을 이용한 최소 노름 해 방식이 사용된다[14]. 이 방식은 요구 토크를 만족하는 여러 입력 조합 중 입력 노름이 최소가 되는 해를 계산하지만 추력 분배에 사용되는 값들이 실제 구동기 특성과 일치한다는 이상적인 가정을 기반으로 한다.

최근에는 구동기의 불확실성, 포화 및 고장 조건을 고려하기 위해 적응형 제어 할당 기법이 제안되고 있으며 이러한 최적 제어 할당 문제의 목적함수 구성과 계산 효율성에 대한 비교 연구도 이루어지고 있다[15-17]. 그러나 이러한 연구들은 항공기 및 수중 운동체를 대상으로 특정 시점에 발생하는 이산적이고 급격한 구동기 고장에 대해 검증되었으며 시간에 따라 서서히 진행되는 문제에 대한 검증은 제한적이다.

실제 시스템의 제작 및 운용환경에서는 조립 공차, 기구적 마찰, 온도 변화 및 전자기적 특성 변화로 인해 구동기 별 추력상수가 서로 달라지거나 시간에 따라 변화할 수 있다. 특정 구동기의 추력상수가 저하되면 사용되는 추력 행렬의 모델 불일치가 발생하여 명령 토크와 실제 구현 토크 사이에 오차가 발생한다. 특히 전방위 김발 시스템에서는 각 구동기가 특정 단일 축만 담당하는 것이 아니라 여러 구동기의 합성 작용으로 3축 토크를 생성하므로 구동기 간 추력상수 불균형은 단순한 축 별 이득 저하가 아니라 전체 토크의 왜곡된 형태로 나타난다. 그러나 전방위 김발 시스템은 복수의 구동기와 탑재체가 동역학적으로 결합되어 움직이므로 개별 구동기의 상태를 직접 측정하기 어렵다는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 구동기 별 추력상수 상태를 추정하고 이를 추력 분배기에 반영할 수 있는 적응형 분배 구조가 필요하다. 이에 본 논문에서는 구동기 추력상수 저하를 등가 추력상수 계수로 모델링하고 재귀적 최소자승법(Recursive Least Squares, RLS)을 이용하여 개별 구동기의 추력상수 변화를 실시간으로 추정하는 방법을 제안한다. 추정된 추력상수를 유효 추력행렬에 반영하여 구동기 성능 변화에 따른 모델 불일치를 보상하고 가중치 기반 추력 분배를 적용하여 열화된 구동기의 입력 부담을 상대적으로 성능이 유지된 구동기로 재분배한다. 이를 바탕으로 구동기 상태 변화에 적응하면서 명령 토크를 효과적으로 구현할 수 있는 전방위 김발의 적응형 추력 분배 알고리즘을 구성하였다. 제안 기법의 유효성은 MATLAB/Simulink 기반 시뮬레이션을 통해 추력상수 추정 정확도, 명령 토크 구현 성능, LOS 추종 성능 및 열화 구동기의 입력 부담 완화 측면에서 종합적으로 검증하였다.

2. 전방위 김발 시스템 모델

2.1 시스템 구성

본 연구의 전방위 김발은 구형 탑재체 외곽에 90° 간격으로 배치된 4개의 구동기에 의해 Roll(ϕ), Pitch(θ), Yaw(ψ)의 3자유도 회전 운동을 생성하는 구조이다. Fig. 1과 같이 각 구동기의 고정부는 외부 프레임에, 가동부는 탑재체에 연결되며 가동부가 탑재체 접선 방향으로 힘을 인가한다. 구형 탑재체 외곽에 구동기를 분산 배치한다는 개념적 유사성은 구형 이동 플랫폼의 분산 구동 구조에서도 확인할 수 있다[18]. 탑재체의 자세 벡터를 $x = [\phi, \theta, \psi]^T$ 라 하고 4개의 구동기의 개별 추력 벡터를 $F = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$ 라 정의한다. 탑재체 몸체에 고정된 구동기들이 출력하는 개별 힘이 3축 가상 토크로 결합되는 관계는 기하학적 구조 배치 행렬 $B \in \mathbb{R}^{3\times4}$를 통해 식(1)와 같이 정의된다.

$$\tau = B \cdot F \tag{1}$$

행렬 B는 구동기의 부착 반경(R)과 설치 위치 및 추력 작용 방향에 의해 결정되는 기구학적 배치 행렬로 식(2)와 같이 정의된다. 본 시스템에서는 구동기의 고정부가 외부 고정 구조물에 고정되어 있어 탑재체의 자세 변화와 관계없이 추력 작용 위치와

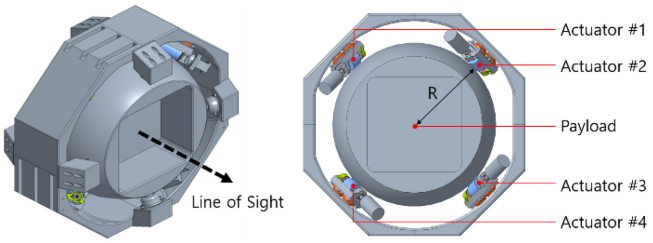


Fig. 1 Configuration of the omnidirectional gimbal system: (a) Overall system configuration and (b) Arrangement of the four actuators and payload

방향이 일정하게 유지된다. 따라서 구동 과정에서 각 구동기의 추력 크기만 변화하며 행렬 B는 일정하게 유지된다.

$$B = R\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

식(2)의 대칭 배치 특성에 따라 4개의 구동기에 동일한 추력이 인가되면 Pitch축과 Yaw축 토크는 상쇄되고 Roll축 토크만 생성된다. 반대로 각 구동기의 부호 조합을 달리하면 개별 축 토크를 독립적으로 생성할 수 있다. 탑재체 전체의 3자유도 회전 동역학 방정식은 3축 회전 관성 행렬 $J \in \mathbb{R}^{3\times3}$과 각가속도 $\ddot{x}$를 이용하여 식(3)와 같이 표현된다.

$$J\ddot{x} = B \cdot F \tag{3}$$

2.2 추력상수 저하 모델

각 구동기가 발생시키는 물리적 추력 $f_i(k)$는 인입 전류 $i_i(k)$와 실시간 구동기 추력 상수 $K_{ti}(k)$의 곱으로 나타난다. 실제 시스템에서는 열화, 온도변화, 마찰 조건 등에 의해 추력 상수가 변화할 수 있다. 이를 모델링하기 위해 본 논문에서는 각 구동기의 시변 특성을 반영한 실시간 추력 상수 변동 모델을 식(4)와 같이 정의한다.

$$F(k) = K_t(k) \cdot I(k)$$
$$= \begin{bmatrix} K_{t1}(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{t2}(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{t3}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{t4}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(k) \\ i_2(k) \\ i_3(k) \\ i_4(k) \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 초기 상태의 추력 상수를 K_{t0}이라고 할 때 실제 운용 중인 시스템의 개별 구동기 추력 상수는 이산 시간 인덱스 k에 대해 식(5)과 같이 모델링 된다.

$$K_{ti}(k) = \alpha_i(k) \cdot K_{t0},\ (i = 1,2,3,4) \tag{5}$$

이때 $\alpha_i(k)$는 각 구동기의 실시간 구동 효율을 나타내는 무차원의 불균형 계수이다. 시스템이 정상 상태일 때는 $a_i(k) = 1$의 값을 가지며 전자기적 열화나 기구적 손실이 심화될수록 $0 \le a_i(k) \le 1$ 범위를 가짐으로써 각 구동기의 실시간 추력 손실을 수학적으로 묘사한다.

3. RLS 기반 적응형 추력 분배

3.1 LOS 기반 자세 제어기

전방위 김발의 자세 제어 목표는 현재 시선 벡터 l이 명령 시선 벡터 l_d를 추종하도록 하는 것이다. 두 벡터를 정규화하면 식(6)과 같다.

$$\hat{l} = \frac{l}{\| l \|},\ \ \hat{l}_d = \frac{l_d}{\| l_d \|} \tag{6}$$

식(7)과 같이 현재 LOS에서 명령 LOS로 회전하기 위한 회전축은 두 벡터의 외적으로 정의되며 회전각은 내적으로 계산된다. 따라서 회전 오차 벡터는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \frac{\hat{l} \times \hat{l}_d}{\| \hat{l} \times \hat{l}_d \|}, \theta_e = \cos^{-1}(\hat{l}^T \cdot \hat{l}_d) \tag{7}$$

$$e_r = \theta_e n \tag{8}$$

본 연구에서는 회전 오차 벡터와 각속도 피드백을 이용하여 식(9)와 같은 PD자세 제어기를 구성하였다.

$$\tau_e = K_p e_r - K_d \omega \tag{9}$$

여기서 τ_e는 추력 분배기에 전달되는 3축 토크 명령이며 ω는 탑재체의 각속도이다.

3.2 기존 의사역행렬 기반 추력 분배

전방위 김발 시스템은 4개의 구동기가 동시에 작용하여 탑재체의 3축 회전 토크를 생성하는 과구동 구조이다. 따라서 자세 제어기에서 생성된 명령 토크를 개별 구동기의 입력으로 변환하기 위한 추력 분배 과정이 필요하다. 일반적으로 과구동 시스템에서는 요구 토크를 만족하는 입력 조합이 무수히 존재하므로 가장 널리 사용되는 방법은 식(10)과 같이 의사역행렬을 이용한 최소 노름 해를 계산하는 것이다.

$$I(k) = pinv(B \cdot K_t(k)) \cdot \tau_e \tag{10}$$

하지만 실제 전방위 김발 시스템에서는 구동기의 온도 상승, 기계적 마모 및 자기 특성 변화 등에 의해 각 구동기의 추력상수가 시간에 따라 변화할 수 있다. 이러한 경우 기존 의사역행렬 기반 추력 분배에서는 명령 토크와 실제 생성 토크 사이에 오차가 발생하게 되며 구동기 열화가 심할수록 모델 불일치가 증가하게 된다.

3.3 RLS 기반 추력 상수 추정

앞 절에서 설명한 바와 같이 구동기 특성이 변화하는 상황에서는 모델 불일치가 발생한다. 따라서 변화하는 구동기 특성을 실시간으로 추정하여 추력 분배기에 반영할 수 있는 적응형 파라미터 추정 과정이 필요하다. 본 연구에서는 구동기 전류 입력과 생성 토크 간의 관계를 기반으로 재귀적 최소자승법(Recursive Least Squares, RLS)을 적용하여 구동기 추력상수를 실시간으로 추정하였다. RLS는 이전 단계의 추정 결과를 이용하여 새로운 데이터가 입력될 때마다 파라미터를 갱신할 수 있어 시간에 따라 변화하는 구동기 특성을 추정하는 상황에 적합하다. 실제 생성 토크와 입력 전류 데이터를 기반으로 한 선형 회귀 모델은 식(11)과 같이 표현된다.

$$Y(k) = H(k) \cdot \theta(k) \tag{11}$$

$Y(k) \in \mathbb{R}^{3\times1}$ 는 탑재체에 인가되는 동적 토크 벡터이며 $H(k) \in \mathbb{R}^{3\times4}$ 는 추력 분배 행렬과 전류 입력으로 구성된 회귀 행렬이다. $\Theta(k) = [\hat{K}_{t1}(k), \hat{K}_{t2}(k), \hat{K}_{t3}(k), \hat{K}_{t4}(k)]^T$ 는 추정 대상인 개별 구동기의 추력 상수 벡터이다.

추력 상수 벡터는 매 샘플링 시간마다 획득되는 데이터에 대해 이전 시점의 추정 값과 현재 예측 오차를 이용하여 갱신된다. 식(12)과 같이 예측 오차를 $\varepsilon(k)$ 를 계산한 후 식(13)과 같이 칼만 이득 $L(k)$ 를 업데이트 한다.

$$\epsilon(k) = Y(k) - H(k)\hat{\Theta}(k-1) \tag{12}$$

$$L(k) = \frac{P(k-1)H^T(k)}{\lambda \cdot I_{3\times3} + H(k)P(k-1)H^T(k)} \tag{13}$$

여기서 $\lambda(0<\lambda<1)$ 는 과거 데이터의 가중치를 점진적으로 감소시켜 실시간 파라미터 변동에 대한 추종 성능을 높이는 망각인자(Forgetting Factor)이며 $I_{3\times3}$ 는 단위행렬이다. 계산된 이득을 토대로 식(14)와 같이 파라미터 추정 벡터를 갱신하고, 식(15)와 같이 오차 공분산 행렬 $P(k)$ 를 업데이트한다.

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + L(k)\epsilon(k) \tag{14}$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}\left[P(k-1) - L(k)H(k)P(k-1)\right] \tag{15}$$

제안한 RLS 알고리즘은 각 구동기의 전류 입력이 동시에 작용하는 과구동 환경에서도 개별 구동기의 추력 상수를 독립적으로 추정할 수 있다. 따라서 특정 구동기의 추력상수가 변화하더라도 이를 실시간으로 식별할 수 있으며 추정 결과는 다음 절에서 설명하는 적응형 추력 분배기의 유효 추력행렬 구성에 사용된다.

3.4 추력상수 기반 적응형 추력 분배

앞 절에서 추정한 구동기 추력상수는 적응형 추력 분배기의 유효 추력행렬을 구성하는 데 사용된다. 하지만 적응형 추력 분배만 적용할 경우 추력상수가 저하된 구동기에도 요구 토크를 만족시키기 위해 상대적으로 큰 전류가 인가될 수 있다. 이러한 전류 증가는 구동기의 발열을 증가시키고 추가적인 성능 저하를 유발할 수 있다. 따라서 열화된 구동기의 입력 부담을 완화하기 위해 추정된 추력 상수를 기반으로 한 가중치 행렬 $W(k) \in \mathbb{R}^{4\times4}$ 를 도입하였다. 실시간 구동기 상태를 반영하는 가중치 행렬은 식(16)과 같이 정의된다.

$$W(k) = \begin{bmatrix} \hat{K}_{t1}(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{K}_{t2}(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{K}_{t3}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{K}_{t4}(k) \end{bmatrix} \tag{16}$$

제한된 전류 자원 내에서 요구 토크를 만족하며 열화된 구동기의 입력 부담을 최소화하기 위해 식(17)과 같은 목적함수를 정의하였다. 식(16)의 가중치 행렬은 추정된 구동기 추력상수로 구성되며 목적함수에서는 그 역행렬인 $W^{-1}(k)$ 가 각 구동기 전류에 대한 비용 행렬로 사용된다. 따라서 구동기의 추력상수가 감소할수록 $W^{-1}(k)$ 의 대응 대각원소는 증가하게 되며 동일한 전류에 대해서도 더 큰 비용이 부여된다. 이에 따라 최적화 과정에서는 요구 토크를 만족하는 범위 내에서 추력상수가 저하된 구동기 전류 사용이 자연스럽게 억제된다. 또한 추력 분배는 요구 토크를 만족해야 하므로 식(18)과 같은 제약조건을 적용하였다.

$$J_{\text{cost}} = I^T(k)W^{-1}(k)I(k) \tag{17}$$

$$\tau_{\text{cmd}} = BW(k)I(k) \tag{18}$$

식(17)의 목적함수를 최소화하면서 식(18)의 제약조건을 만족하는 최적화 문제를 라그랑주 승수법으로 풀면 식(19)와 같은 가중치 기반 의사역행렬 형태의 적응형 추력 분배식을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 최종적으로 각 구동기에 인가되는 전류 명령은 식(20)과 같이 계산된다.

$$B_w^{\dagger}(k) = W^{-1}(k)B^T(BW^{-1}(k)B^T)^{-1} \tag{19}$$

$$I_{\text{cmd}}(k) = \begin{bmatrix} i_{\text{cmd1}}(k) \\ i_{\text{cmd2}}(k) \\ i_{\text{cmd3}}(k) \\ i_{\text{cmd4}}(k) \end{bmatrix} = B_w^{\dagger}(k) \cdot \tau_{\text{cmd}}(k) \tag{20}$$

제안한 가중치 기반 추력 분배에서는 추정된 추력상수가 감소할수록 해당 구동기의 전류 비용이 증가하도록 설계하였다. 따라서 추력상수가 저하된 구동기의 전류 기여도는 감소하고 부족한 토크는 상대적으로 추력상수가 높은 다른 구동기로 재분배된다. 이를 통해 요구 토크를 유지하면서도 열화된 구동기의 입력 부담을 효과적으로 완화할 수 있다.

Table 1 Simulation parameters

Category	Parameter	Value
Simulation	Sampling time	0.0001 s
	Simulation time	10 s
	LOS command	Cone trajectory
Controller	K_p	2
	K_d	4
RLS	Forgetting factor (λ)	0.99
	Initial parameter	[1 1 1 1]
	Initial covariance	$10I$
Actuator	Number of actuators	4
	Force constant	1.0 (Nominal)
Geometry	Moment arm (R)	145 mm

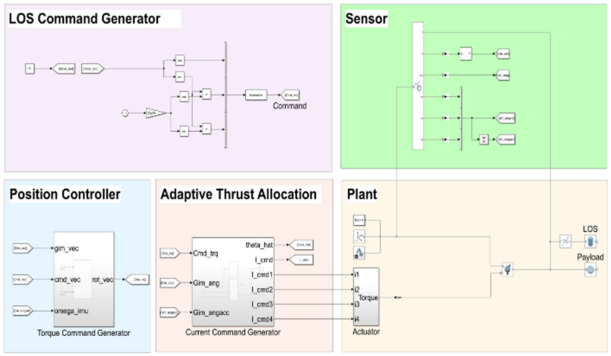


Fig. 2 Simulink-based simulation block diagram of the proposed omni-directional gimbal control system

4. 시뮬레이션 실험 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경

제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 환경에서 전방위 김발 시스템을 모델링하였다. 전체 시뮬레이션 모델은 LOS 명령 생성기, LOS 기반 자세 제어기, RLS 기반 적응형 추력 분배기 및 구동기-탑재체 동역학 모델로 구성하였다. 자세 제어기는 현재 LOS와 명령 LOS 사이의 오차를 이용하여 3축 명령 토크를 생성하고 추력 분배기는 이를 4개의 구동기 전류 명령으로 변환된다. 각 구동기의 추력상수는 시간에 따라 선형적으로 감소하도록 설정하여 구동기 열화에 따른 유효 추력상수 저하 상황을 모사하였다. 시뮬레이션에서는 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식, RLS 기반 추력상수 보상 방식 그리고 가중치 기반 적응형 추력 분배 방식을 비교하였다. 모든 비교 조건에서 동일한 LOS 명령, 동일한 자세 제어기 이득 및 동일한 구동기 열화 조건을 적용하여 추력 분배 알고리즘에 따른 성능 차이를 평가하였다. 주요 시뮬레이션 파라미터는 Table 1과 같으며 전체 제어 및 식별 구조는 Fig. 2와 같다.

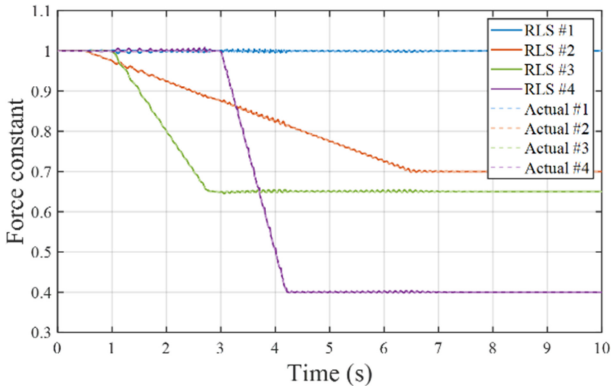


Fig. 3 Actual and estimated actuator force constants using RLS

Table 2 RMSE of estimated actuator force constants

Motor	RMSE
#1	0.0012
#2	0.0014
#3	0.0015
#4	0.0019
Average	0.0015

4.2 RLS기반 추력상수 추정 결과

RLS 알고리즘의 식별 성능을 검증하기 위해 구동기별 추력상수 저하 시나리오를 구성하였다. 일부 구동기는 정상 추력상수를 유지하도록 설정하였고 일부 구동기는 서로 다른 기울기로 추력상수가 감소하도록 설정하여 비대칭 열화조건을 모사하였다.

Fig. 3은 실제 추력상수와 RLS 기반 추정 추력상수를 비교한 결과이다. RLS 식별기는 시간에 따라 변화하는 추력상수를 안정적으로 추정하였으며 복수의 구동기가 서로 다른 비율로 열화되는 조건속에서도 각 구동기의 추력상수 변화를 분리하여 추정하였다. 이는 제안한 회귀모델이 전방위 김발의 과구동 구조에서 발생하는 합성토크와 구동기 전류 입력 사이의 관계를 이용하여 개별 구동기의 유효 추력상수를 식별할 수 있음을 의미한다.

추력상수 식별 성능은 추정된 추력상수와 실제 추력상수의 추정 오차에 대한 RMSE를 이용하여 평가하였다. Table 2는 각 구동기에 대한 추력상수 추정 RMSE를 나타낸다. 모든 구동기에서 추정 RMSE는 낮은 수준으로 유지되었으며 이를 통해 제안한 RLS 기반 식별기가 추력상수 변화 조건에서 적응형 추력 분배에 필요한 파라미터 정보를 안정적으로 제공할 수 있음을 확인하였다. RLS 설계 파라미터 변화에 따른 추정 성능의 민감도를 추가로 분석하였다. 망각인자 λ는 시간에 따라 변화하는 추력상수에 대한 추종 특성을 결정하는 주요 파라미터이며, 초기 추정값은 실제 시스템에서 발생할 수 있는 구동기 추력상수의 초기 불확실성을 고려하기 위해 선정하였다. 이에 따라 기존의 구동기 열화 조건을 동일하게 유지한 상태에서 망각인자와 초기 추정값의 조합을 변화시키며 추정상수 추정 RMSE를

Table 3 RMSE of estimated force constants according to the forgetting factor and initial parameter

No.	Forgetting Factor (λ)	Initial parameter	RMSE ($\times 10^{-3}$)
1	0.98	0.8	1.81
2	0.98	1.0	1.78
3	0.98	1.2	1.84
4	0.99	0.8	1.56
5	0.99	1.0	1.51
6	0.99	1.2	1.57
7	0.995	0.8	1.69
8	0.995	1.0	1.65
9	0.995	1.2	1.71

비교하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 분석결과 모든 파라미터 조합에서 추력상수 추정 RMSE가 1.81 × 10^{-3} 이하로 나타났으며, 이는 파라미터 변화에 따른 성능 차이가 제한적인 수준임을 확인할 수 있다. 이를 통해 검토한 망각인자 및 초기 추정값 범위에서 제안한 RLS기반 추력상수 추정이 일관된 추정 성능을 유지함을 확인하였다.

4.3 토크 구현 성능 비교

구동기의 추력상수 저하 조건에서 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식과 제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식의 토크 구현 성능을 비교하였다. 기존 의사역행렬 방식은 모든 구동기의 추력상수가 동일하다는 명목 모델을 기준으로 전류 명령을 계산하므로 실제 추력 상수가 변화하는 경우 명령 토크와 생성 토크 사이에 불일치가 발생한다. 반면 제안한 RLS 기반 보상 방식은 추정된 추력상수를 유효 추력 행렬에 반영하여 전류 명령을 계산하므로 실제 생성 토크가 명령 토크를 보다 정확하게 구현할 수 있다. 토크 구현 오차는 식(21)과 같이 정의하였다.

$$e_\tau(k) = \tau_{\text{cmd}}(k) - \tau_{\text{real}}(k),\ \text{RMSE}_\tau = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \| e_\tau(k) \|^2} \quad (21)$$

τ_{cmd} 는 자세 제어기에서 생성된 명령 토크이며 τ_{real} 은 구동기 추력상수 저하가 반영된 실제 생성 토크이다. Fig. 4는 기존 의사역행렬 방식과 제안한 RLS 기반 보상 방식의 3축 토크 추종 결과이며 전체 시뮬레이션 중 3–4 s구간을 확대하여 나타낸 것이다. 이 구간은 2번과 3번 구동기의 열화가 누적된 상태에서 4번 구동기의 급격한 추력상수 감소가 시작되므로 모델 불일치 영향이 뚜렷한 구간이다. 기존 방식에서는 실제 토크가 명령을 추종하지 못하지만 RLS 방식은 추정된 추력상수를 유효 추력 행렬에 반영하여 실제 생성 토크가 명령 토크와 거의 일치하는 결과를 보였다. 정량적인 성능 비교를 위해 전 구간에 대해 Table 4과 같이 각 축의 토크 구현 RMSE를 계산하였다. 제안한 RLS 기반 보상 방식은 기존 의사역행렬 방식 대비 토크 오차를

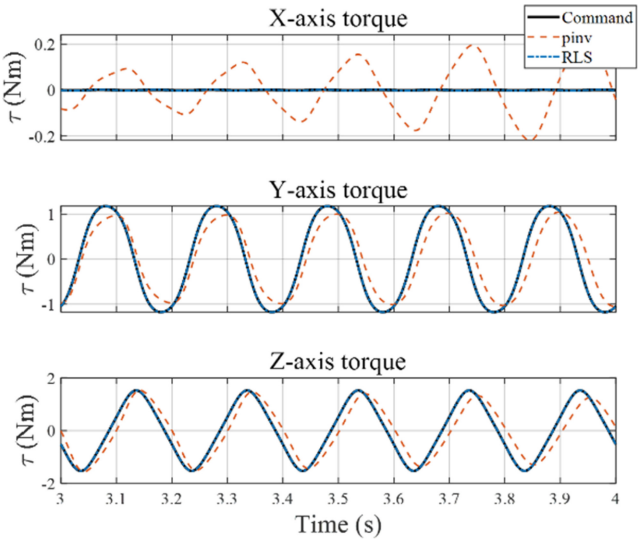


Fig. 4 Comparison of commanded and generated torques during 3–4 s

Table 4 Comparison of torque tracking RMSE

Method	X-axis	Y-axis	Z-axis	Average
Pinv	0.2387	0.2975	0.2857	0.2740
RLS	0.0001	0.0010	0.0012	0.0008

99% 이상 감소시켰다. 이는 RLS를 통해 추정된 구동기 추력상수가 유효 추력 행렬을 효과적으로 보정함으로써 추력상수 변화에 의해 발생하는 모델 불일치를 감소시켰기 때문이다.

4.4 LOS 추종 성능 비교

LOS 추종 성능은 명령 LOS와 실제 LOS 사이의 각도 오차를 이용하여 평가하였다. 명령 LOS 벡터는 x축을 기준으로 원뿔 궤적을 형성하도록 식(22)와 같이 설정하였다.

$$l_d(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta\cos\phi(t) \\ \sin\theta\sin\phi(t) \end{bmatrix}, \phi(t) = 2\pi ft \quad (22)$$

이러한 명령은 연속적으로 변화하는 시선 이동을 모사하며 전방위 김발의 연속 추종 성능을 평가하기 위해 사용하였다. LOS 오차는 식(23)과 같이 명령 LOS와 실제 LOS의 사이각으로 정의하였다.

$$e_{\text{LOS}}(k) = \cos^{-1}(l_d^T l(k)),\ \text{RMSE}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_{\text{LOS}}^2(k)} \quad (23)$$

Fig. 5은 기존 의사역행렬 방식과 제안한 RLS 기반 보상 방식의 LOS 오차 결과를 나타낸다. 두 방식 모두 상위 PD자세 제어기에 의해 명령 LOS를 안정적으로 추종하였으나 제안된 방식은 토크 구현 정확도가 향상됨에 따라 전체 시뮬레이션 구간에서LOS 오차가 감소하였다. 특히 Fig. 4의 토크 구현 오차가 증가하는 3–4 s 구간에서는 Fig. 5에서도 기존 의사역행렬 방식의

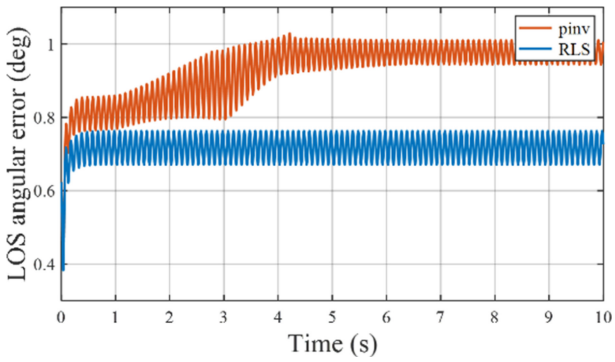


Fig. 5 LOS tracking response and LOS error comparison

Table 5 Comparison of LOS tracking RMSE

Method	RMSE (deg)
Pinv	0.9297
RLS	0.7021

LOS 오차가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 구동기 추력상수 저하로 인해 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 차이가 발생하고 해당 토크 오차가 탑재체의 회전 동역학을 통해 LOS 응답에 영향을 미치기 때문이다. 반면 제안한 적응형 추력 분배 방식은 추정된 추력 상수를 추력 분배 행렬에 반영하므로 열화된 구동기의 실제 출력 특성을 고려하여 명령 토크를 보다 정확하게 구현하며 이에 따라 동일 구간에서의 LOS 추종오차 증가도 완화된다.

정량적인 성능 비교를 위해 전체 시뮬레이션 구간에 대해서 명령 LOS와 실제 LOS 사이의 추종 오차에 대한 RMSE를 계산하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식은 기존 의사역행렬 방식 대비 LOS RMSE를 약 24.5% 감소시켰다. 이러한 결과는 토크 구현 성능의 향상이 LOS 추종성능 개선으로 이어진다는 두 성능지표 간의 연관성을 보여준다. 그러나 토크 구현 RMSE는 99% 이상 감소한 반면 LOS RMSE는 24.5% 감소하여 상대적으로 작은 개선율을 보였으며 이는 서로 선형적으로 비례하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

이는 토크 RMSE가 추력 분배 단계에서 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 오차를 직접 평가하는 지표이지만 LOS RMSE는 해당 토크가 상위 PD 자세제어기의 폐루프 보상까지 반영된 최종 시스템 응답이기 때문이다. 기존 방식에서 토크 구현 오차가 발생하더라도 상위 PD 제어기는 증가한 LOS오차에 따라 추가적인 보상 토크를 생성하여 자세 오차를 지속적으로 감소시킨다. 따라서 하위 추력 분배 단계의 토크 오차가 크게 감소하더라도 최종 LOS 오차의 개선율은 동일한 비율로 나타나지 않는다. 본 결과에서 제안 방법의 직접적인 효과는 구동기 열화로 인한 토크 구현 오차를 감소시키는 것이며 LOS 성능 개선은 이와 같은 토크 구현 정확도 향상이 상위 폐루프 시스템에 반영된 결과이다.

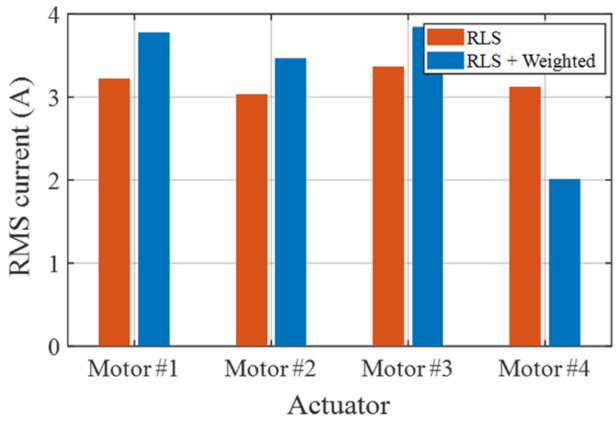


Fig. 6 Comparison of RMS currents for each actuator

Table 6 Comparison of RLS and weighted RLS allocation

Method	RLS	RLS+ Weighted	Change
Torque RMSE	7.667×10^{-4}	7.752×10^{-4}	+1.1%
LOS RMSE	7.0215×10^{-1}	7.0216×10^{-1}	< 0.01%
Total RMS current	12.7444	13.0990	+2.8%
RMS current (Motor#4)	3.1244	2.0073	-35.8%

4.5 가중치 기반 추력 분배 검증

추정된 추력상수를 이용한 가중치 기반 추력 분배의 효과를 검증하였다. 기본 RLS기반 적응형 추력 분배 방식은 명령 토크를 정확하게 구현하기 위해 추력상수가 저하된 구동기에도 상대적으로 큰 전류를 인가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 추력상수가 크게 저하된 구동기의 입력 부담을 완화하기 위해 가중치 기반 추력 분배를 적용하였으며 기본 RLS 기반 방식과 가중치 기반 적응형 추력 분배 방식을 비교하였다. Fig. 6은 각 구동기의 RMS 전류를 비교한 결과를 나타낸다. 가중치 기반 추력 분배를 적용한 경우, 추력상수가 가장 크게 저하된 4번째 구동기의 RMS 전류는 기본 RLS 기반 방식 대비 35.8% 감소하였다. 이는 제안한 가중치 행렬이 추력상수가 저하된 구동기의 입력 사용을 억제하고 부족한 토크 생성 성분을 상대적으로 정상 상태에 가까운 다른 구동기로 재분배했기 때문이다. 반면 동일한 명령 토크를 유지하기 위해 다른 구동기의 전류 사용량이 증가하면서 전체 RMS 전류는 기본 RLS 기반 방식 대비 약 2.8% 증가하였다.

추가적으로 두 방식의 토크 구현 성능과 LOS 추종 성능을 정량적으로 비교한 결과를 Table 6에서 확인할 수 있다. 가중치 기반 추력 분배를 적용한 경우 토크 구현 RMSE와 LOS RMSE는 기본 RLS 기반 방식과 거의 동일한 수준을 유지하였다. 이는 가중치 기반 추력 분배가 요구 토크를 만족하는 제약조건을 유지하면서 추력상수가 저하된 구동기의 입력 부담을 완화할 수 있음을 의미한다.

따라서 제안한 가중치 기반 추력 분배는 전체 전류 사용량을 최소화하는 방법이 아니라 구동기 상태를 고려하여 토크 생성 부담을 재분배함으로써 열화된 구동기의 입력 부담을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 구동기 추력상수 변화가 발생하는 전방위 김발 시스템을 대상으로 RLS 기반의 구동기 추력상수 식별 알고리즘과 이를 이용한 적응형 추력 분배 기법을 제안하였다. 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식은 모든 구동기의 추력상수가 동일하다는 명목 모델을 기반으로 전류 명령을 계산하므로 실제 시스템에서 발생하는 구동기 열화 및 추력상수 변화에 의해 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 오차가 발생하는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 구동기별 추력상수를 실시간으로 추정하는 RLS 기반 식별기를 설계하고 추정된 추력상수를 유효 추력행렬에 반영하는 적응형 추력 분배 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 기반의 전방위 김발 시스템을 구축하고 구동기별 추력상수가 서로 다른 비율로 감소하는 비대칭 열화 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 RLS 알고리즘은 시간에 따라 변화하는 구동기 추력상수를 안정적으로 추정하였으며 추정된 추력상수를 추력 분배기에 반영함으로써 기존 의사역행렬 기반 방식 대비 명령 토크 구현 RMSE를 99% 이상 감소시켰다. 또한 토크 구현 정확도 향상은 최종 LOS 추종 성능 개선으로 이어져 LOS RMSE를 약 24.5% 감소시켰다. 이는 RLS 기반 추력상수 식별을 통해 유효 추력행렬의 모델 불일치를 효과적으로 보정함으로써 전방위 김발 시스템의 토크 생성 정확도와 LOS 추종 성능을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인한 결과이다.

추가적으로 추정된 추력상수를 기반으로 가중치 기반 적응형 추력 분배를 적용하여 열화된 구동기의 입력 부담 완화 효과를 검증하였다. 그 결과, 추력상수가 가장 크게 저하된 4번 구동기의 RMS 전류는 기본 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식 대비 약 35.8% 감소하였으며 동일한 명령 토크를 유지하기 위해 전체 RMS 전류는 약 2.8% 증가하였다. 이는 제안한 가중치 기반 추력 분배가 전체 전류 사용량을 최소화하는 것이 아니라 열화된 구동기의 입력 부담을 완화하면서 구동기 간 토크 생성 부담을 효과적으로 재분배하는 방법임을 보여준다.

본 연구는 RLS 기반 추력상수 식별 및 적응형 추력 분배 기법을 통해 토크 구현 정확도와 LOS 추종 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였으나 시뮬레이션 기반 검증이라는 한계를 갖는다. 실제 하드웨어 적용 시에는 RLS 식별에 필요한 동적 토크를 직접 측정하기 어렵기 때문에 IMU 기반의 각속도 및 각가속도 정보와 탑재체 관성 모델을 이용한 토크 재구성 또는 외란 관측기 기반의 토크 추정 과정이 필요하다. 또한 실제 구동기의 전류 및 전압 포화와 열적 제한을 고려하여 추력 분배 과정에 구동기별 입력 제한을 반영해야 한다. 향후에는 실제 전방위 김발 하드웨어에 제안한 알고리즘을 적용하여 다양한 외란 조건에서의 실험을 수행하고 실시간 제어 성능 및 실제 적용 가능성을 검증할 예정이다.

REFERENCES

1. Ekstrand, B., (2001), Equations of motion for a two-axes gimbal system, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 37(3), 1083-1091.
2. Seo, H., Park, J., Ahn, J.-H., (2018), Los moving algorithm design of electro-optical targeting pod for joystick command, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 67(10), 1395-1400.
3. Ahn, J., Baek, W., Park, J., (2011), A design of 3-axis gimbaled LOS stabilization system for an avionic EO/IR system, Proceedings of the Information and Control Symposium, 199-200.
4. Kandemir, K. D., Akmese, A., Yazicioglu, Y., (2014), Line-of-sight stabilization of a gimbaled mechanism under passive base isolation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 228(1), 35-43.
5. Hwang, S. P., Park, J. H., Hong, S. K., (2012), Control system design for a UAV-mounted camera gimbal subject to coulomb friction, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 18(7), 680-687.
6. Kennedy, P. J., Kennedy, R. L., (2003), Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 11(1), 3-15.
7. Hilkert, J., (2008), Inertially stabilized platform technology concepts and principles, IEEE Control Systems Magazine, 28(1), 26-46.
8. Skoglar, P., Swedish Defence Research Agency, (2002), Modelling and control of IR/EO-gimbal for UAV surveillance applications. https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2004102201.xhtml
9. Cong Danh, N., (2021), The Stability of a Two-Axis Gimbal System for the Camera, The Scientific World Journal, 2021(1), 9958848.
10. Choi, D. G., Park, J. Y., Ahn, J. H., (2020), Design of line of sight stabilization controller gimbaled system on aircraft, Proceedings of the Conference on Information and Control Systems, 444-445.
11. Shin, S. C., Moon, H. C., Park, J. Y., Lee, S., (2019), LQG optimal controller design of 2-axis gimbal servo system for line of sight stabilization, Proceedings of the Conference on Information and Control Systems, 164-165.

12. Hilkert, J. M., Jonas, M., (2008), A unique three-axis gimbal mechanism, Proceedings of the SPIE Defense + Security, 6971.

13. Qi, Y., Wang, H. L., Xu, Q. Q., Du, Y. L., Shao, X. Z., Yang, H., (2021), A new flexible gimbal for electro-optical sighting system (EOSS), Optik, 242, 167016.

14. Johansen, T. A., Fossen, T. I., (2013), Control allocation—A survey, Automatica, 49(5), 1087-1103.

15. Tohidi, S. S., Yildiz, Y., Kolmanovsky, I., (2020), Adaptive control allocation for constrained systems, Automatica, 121, 109161.

16. Akram, W., Casavola, A., Miškovic, N., (2022), Robust adaptive control allocation schemes for overactuated underwater vehicles under actuator faults, IFAC-PapersOnLine, 55(6), 67-72.

17. Blaha, T. M., Smeur, E. J. J., Remes, B. D. W., (2023), A survey of optimal control allocation for aerial vehicle control, Actuators, 12(7), 282.

18. Kumagai, M., (2010), Development of a ball drive unit using partially sliding rollers—An alternative mechanism for semi-omnidirectional motion—, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3352-3357.



Cheonkyu Park
Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is Robotics engineering.
E-mail: dothkyu@hanwha.com



Jungho Kim
Senior Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is Robotics engineering.
E-mail: gogo2436@hanwha.com



Dae Gyu Choi
Principal Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is LOS stabilization control.
E-mail: daegyu.choi@hanwha.com