

Null space 전류 벡터 주입을 통한 자기장 합성 시스템 전류 지령 수정방법

홍진수, 이준, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Current Reference Adjustment Method Using Null Space Vector Injection in Magnetic Manipulation System

Jin-Su Hong, Jun Lee, Jung-Ik Ha

School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

기존의 다중 코일을 이용한 소형 자성체를 제어하는 시스템에서 전류 벡터 지령은 구동 매트릭스의 pseudo-inverse를 사용하여 계산되었다. 본 논문에서는 기존의 전류 지령에 null space 전류 벡터 지령을 더하는 방법을 이용하여 현재 전류 벡터값과 목표 전류 벡터 지령 사이의 전류 변화량이 최소화 되는 전류 지령 수정 방식을 제안한다. 제한된 전압 정격 내에서 제안된 방식을 적용할 경우 전류 지령 벡터값에 도달하는 시간이 짧아짐으로, 기존 방식에 비해 빠른 반응성을 얻을 수 있다. 제안된 방법은 Matlab® Simulink®를 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 전력전자 기술의 고도화와 자성체의 발달에 따라 소형 자성체(이하 마이크로로봇)를 인체에 주입하고, 자기장을 인가하여 의료 시술에 활용하려는 시도가 증가하고 있다. 마이크로로봇을 제어하기 위한 자기장은 인체 외부의 코일 전류를 제어함으로써 형성된다. 마이크로로봇이 위치한 지점에서 원하는 자기장 방향(B_x B_y B_z)과 힘(F_x F_y F_z)을 인가하기 위해서는 최소 8개의 코일이 필요하고, 각각 독립적으로 전류가 제어 될 수 있어야 한다^[1].

자기장 방향, 힘과 각 코일의 전류 사이 관계는 6*8 매트릭스로 나타나고 이러한 매트릭스를 ‘구동 매트릭스’라고 한다. 구동 매트릭스는 마이크로로봇의 위치와 방향에 따라 계속적으로 바뀌게 된다. 기존의 마이크로로봇 제어시스템에서는 원하는 자기장 방향과 힘에 구동 매트릭스의 pseudo-inverse를 곱하여 얻어진 동손 최소화 전류 벡터 지령을 제어하도록 하고 있다.

본 논문에서는 기존의 동손 최소화 전류 벡터 지령에 구동 매트릭스의 null space 전류 벡터 지령을 더하여 마이크로로봇이 원하는 자기장 지령과 힘 지령에 더 빠르게 반응하는 방법을 제안한다.

2. Null space 벡터 전류 주입 방법

2.1 전압 제한이 있는 시스템의 전류 제어 속도

단일 코일의 전류 제어는 비례적분제어기를 통해서 이루어지며, 비례이득을 $L \cdot \omega_{cc}$ 로 적분이득을 $R \cdot \omega_{cc}$ 로 설정하면 전류 지령에 따른 코일 전류가 1차 저역 필터 형태로 표현된다. 이때 목표 지령 전류에 도달하는 정착 시간은 $4/\omega_{cc}$ 가 된다. 그러나 인버터 시스템의 물리적인 한계로 인한 전압제한으로 제어기의 출력이 정격 전압을 넘어서게 되면 제어기의 출력은 정격전압 안으로 수정되어 출력된다. 이러한 경우 정착 시간은 더 이상 $4/\omega_{cc}$ 가 되지 못하고, 정격 전압과 현재 전류와 목표전류

사이의 변화량에 종속적이게 된다.

$$\Delta t \approx L_{coil} \frac{\Delta I}{V_{rated}} \quad (1)$$

2.2 기존의 전류 지령 벡터 생성 방법

주어진 자기장과 힘 지령에 대해서 해당 지령을 수행할 수 있는 전류 벡터 지령은 그림1과 같이 8차원 공간에서 2차원 평면으로 나타난다.

기존의 시스템은 자기장 방향, 힘 지령에 대해서 2차원 평면으로 주어지는 전류 벡터 지령 중 동손이 최소화 되는 전류 벡터 지령($I_{ref}[n]$)으로 제어된다. 동손 최소화 전류 벡터 지령은 시스템의 효율 측면에서 우수한 특성을 보인다. 그러나 현재 전류 벡터($I[n-1]$)와 동손 최소화 전류 벡터 지령 사이의 전류 변화량이 크거나 전류 제어기의 대역폭이 커서 전압 제한이 걸린 상황에서는 원하는 자기장 방향, 힘 지령에 대해 마이크로로봇의 제어 반응성이 늦어지게 된다.

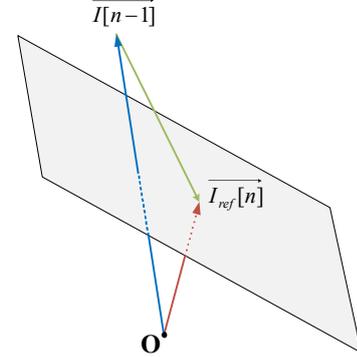


그림 1 전류 벡터 지령 평면

2.3 전류 지령 벡터 변화량 최소화 방법

본 논문에서는 전류제어시스템의 전류 지령 벡터를 동손 최소화 전류 벡터 지령으로 하지 않고, 2차원 평면으로 주어지는 전류 벡터 지령 중 전류 벡터 변화량이 최소화 되는 지점으로 제어한다.

주어진 구동 매트릭스의 독립적인 null space 벡터 \vec{n}_1, \vec{n}_2 를 구한다.

$$A * \begin{bmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \end{bmatrix}, \quad \vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad (2)$$

이후 동손 최소화 전류 벡터 지령과 현재 전류 벡터의

차이인 $\vec{\Delta I}[n]$ 를 앞서 구한 null space 벡터에 각각 정사영한다. 정사영한 벡터를 동손 최소화 전류 벡터 지령에서 빼면 현재 전류 벡터 $\vec{I}[n-1]$ 와 최단거리의 전류 벡터 지령을 구할 수 있다.

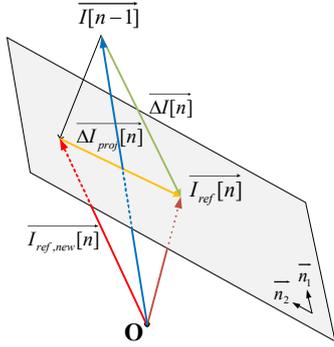


그림 2 전류 지령 벡터 변화량 최소화

$$\vec{\Delta I}_{proj1} = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{\Delta I}[n]}{n_1} \vec{n}_1, \quad \vec{\Delta I}_{proj2} = \frac{\vec{n}_2 \cdot \vec{\Delta I}[n]}{n_2} \vec{n}_2 \quad (3)$$

$$\vec{I}_{ref,new}[n] = \vec{I}_{ref}[n] - \vec{\Delta I}_{proj1}[n] - \vec{\Delta I}_{proj2}[n] \quad (4)$$

2.3 시뮬레이션을 통한 검증

제안된 전류 지령 벡터 변화량 최소화 방법을 검증하기 위하여 Matlab® Simulink® 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션상의 코일 배치는 8개의 코일을 4개씩 2쌍으로 나누어 한 쌍은 수평면에서 30°, 나머지 한 쌍은 60°로 배치하였으며 코일 2쌍이 XY 평면 상에서 서로 45°가 되도록 배치하였다. 각 코일은 중심으로부터 50 mm 떨어져 있으며, 쌍극자 모델로 가정하였다. 시뮬레이션으로 구성된 블록도는 그림 3과 같으며 사용된 변수들은 표 1에 나타내었다. 자기장 방향과 힘 지령은 중심 부분에 x방향 자기장 지령 5 mT수행 상황에서 Y방향 자기장 지령 5 mT으로 변화한 경우로 테스트 했다.

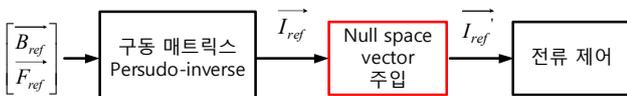


그림 3 시뮬레이션 블록도

표 1 시뮬레이션 변수

변수	값	변수	값
$d_{coil-to-center}$	50[mm]	L_{coil}	50[mH]
M_{robot}	$2 \cdot 10^{-4} [Am^2]$	R_{coil}	0.1[Ω]
Xrobot	2[mm]	B_{ref}	5[mT]
Yrobot	1[mm]	ω_{cc}	1000[rad/s]
Zrobot	1[mm]	V_{limit}	100[V]

주어진 상황에 대하여 현재 전류 벡터, 동손 최소화 전류 벡터 지령, 제안된 전류 벡터 지령을 그림 4에 도시하였다. 기존 상황에서는 최대 전류 변화량이 5.7 A이였으나, 전류 주입을 이용한 경우 최대 전류 변화량이 4 A로 작아진 것을 확인 할 수 있다. 제한된 전압 100 V 내에서 전류 제어가 완료되는 시점을 그림 5에 나타내었다. 동손 최소화 전류 벡터 지령으로 제어할 경우 정착

시간이 3.3 ms로 소요된 반면, 제안된 방법을 적용할 경우에는 2.4 ms에 지령 벡터에 정착할 수 있으므로, 마이크로로봇에 주어진 자기장 방향, 힘 지령을 보다 빠르게 인가 할 수 있다.

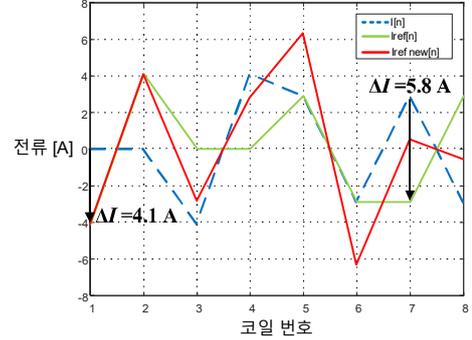


그림 4 코일에 따른 전류 벡터 지령

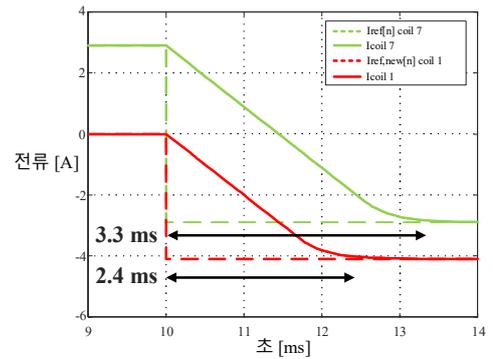


그림 5 각 방법 별 전류 변화량 최대 코일 전류 정착 시간 비교

3. 결론

본 논문에서는 동손 최소화 전류 벡터 지령에 null space 전류 벡터 지령을 더하는 방법을 이용하여 각 코일 전류의 변화량의 최대값이 최소화 되도록 하는 전류 지령 수정 방식을 제안하였다. 제안된 방법은 제어대상 전류의 변화량을 작게 하여 제한된 전압 안에서 기존보다 전류 제어 정착 시점을 단축 할 수 있다. 이러한 제어 방식은 마이크로로봇에 자기장 방향과 힘을 빠르게 인가할 수 있고, 마이크로로봇의 제어 성능을 향상 시킨다.

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 로봇산업융합핵심기술개발사업에 의해 수행됨(10052980).

참고 문헌

- [1] A. J. Petruska and B. J. Nelson, "Minimum bounds on the number of electromagnets required for remote magnetic manipulation," IEEE Trans. Robot., vol. 31, no. 3, pp. 714–722, Jun. 2015.