

Improving Nonnegative Matrix Factorization for Muscle Synergy Analysis: Minimizing Synergy Entropy

Sunghwan Bae¹, Pilwon Hur¹

Gwangju Institute of Science and Technology (GIST College)

sunghwan1@gm.gist.ac.kr Tel. 01095220736

1. 서론

□ 연구 목적 및 필요성

- 비음수 행렬분해(Non-negative Matrix Factorization, NMF)를 이용한 근육 협응 분석(Muscle synergy analysis)은 사람의 근전도 신호를 분석하기 위한 도구로서 많이 활용된다.
- 비음수 행렬분해는 행렬 분해의 결과가 유일하지 않을 가능성이 존재하여 근육 시너지의 이중성 문제를 야기할 수 있다.
- 본 연구에서는 NMF의 결과로 얻어진 시너지 행렬에 임의의 행렬을 곱해 더 낮은 엔트로피를 가지면서 비음수 행렬분해 결과에 영향을 주지 않는 새로운 시너지를 찾아 근육 협응 분석에서 고유성을 보장할 수 있는 방법을 모색하였다.

2. 이론적 배경

□ Muscle Synergy Analysis

- 사람은 움직임을 다양한 근육들의 협력으로 나타낸다. 따라서 근전도 신호로 움직임을 분석하고자 하면 운동의 복잡도가 높아질수록 높은 차원의 data를 분석해야하는 단점이 있다.
- 따라서 PCA, ICA, NMF등 다양한 차원 축소 수학적 기법을 통해 여러 근육이 동시에 활성화되는 패턴을 찾아내어, 복잡한 근육 제어 메커니즘을 단순화하고 이해하는데 도움을 준다.

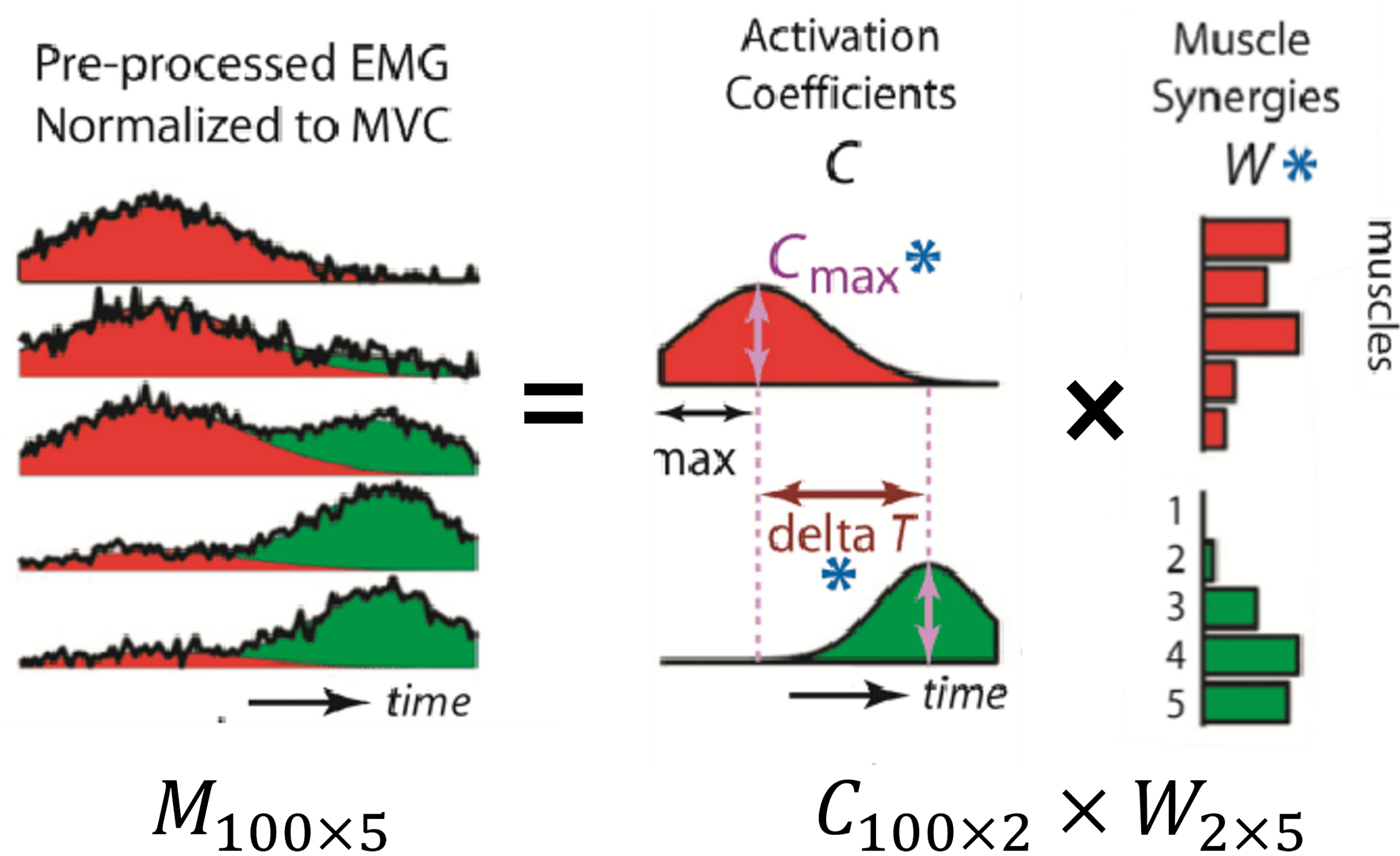


그림 1. NMF를 이용한 Muscle synergy Analysis의 예시

□ NMF and Uniqueness

- NMF는 비음수 행렬을 두 개의 비음수 행렬로 분해하는 기법으로 차원 축소 및 특징 추출에 용이하며 모든 원소가 비음수라는 조건은 특징의 의미 해석에 용이하다는 장점이 있다.
- 다음 수식을 만족하는 정사각행렬 A가 모두 비음수 행렬 C, C' 혹은 W, W'의 순열(permutation)과 크기(scaling)만 조절할 때 NMF 결과가 유일하다고 정의한다.

$$M_{m \times n} \approx C_{m \times r} \times W_{r \times n} = C_{m \times r} \times A \times A^{-1} \times W_{r \times n} = C'W'$$

- NMF 결과의 유일성과 관련된 필요조건은 다음과 같다.

A set S of vectors in \mathbb{R}_+^d is called boundary close if for all $j \neq i$ and $k > 0$ there is an element $s \in S$ such that

$$s_j < ks_i$$

The set of row vectors in C or column vectors W has to be boundary close for the corresponding NMF to be unique

3. 연구 방법

- 데이터 세트

본 연구를 위해 Camargo, Jonathan, et al의 오픈소스 자료 중 treadmill sEMG data를 사용하였다. 10명의 실험자의 5가지 속도 (0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3m/s)에 대해 10가지 보행 데이터를 사용하였다.

- 데이터 분석

각 데이터는 Julia(v.1.8.4)에서 최소 제곱 비음수 행렬분해(ALS-NMF)알고리즘으로 근육 협응 분석을 진행하였다. NMF 결과 행렬의 재구성율(VAF, Variance Accounted For)값이 95%이상인 되는 최소 rank를 시너지 수로 결정하였다.

- 최적화

행렬 A를 찾기 위해 비선형 솔버 JUMP(v.1.12.0)와 IPOPT(v1.4.1)를 사용하였다. 제약조건으로는 행렬 A의 원소의 비음수 조건을 설정하고 목적함수로는 행렬 곱의 각 성분 엔트로피가 최소가 되도록 설정하였다.

4. 연구 결과

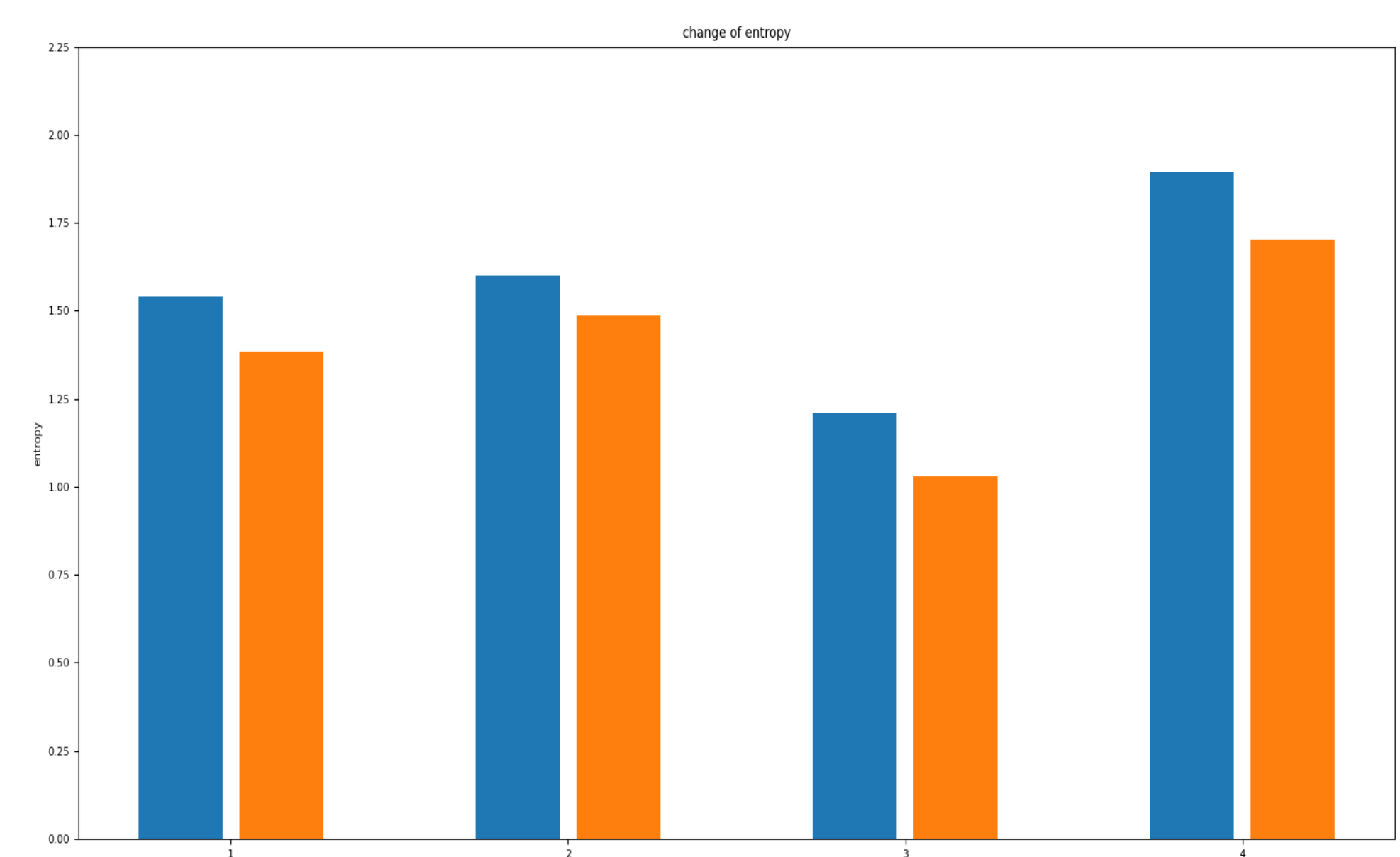


그림 2. 최적화 전, 후의 각 시너지 벡터의 엔트로피 변화

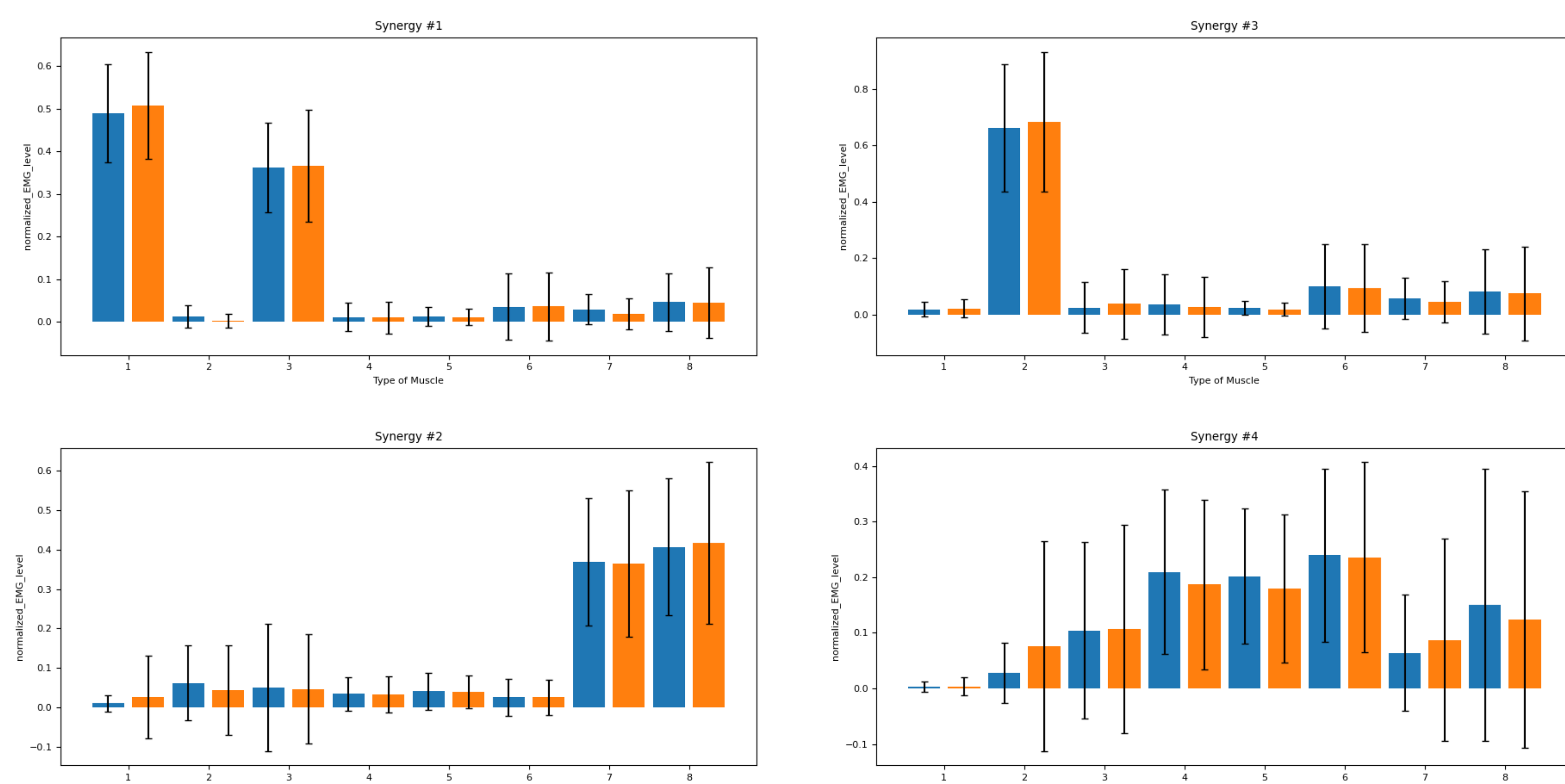


그림 3. 근육 협응 분석 결과인 시너지 행렬들의 평균과 최적화 전 후 비교

4. 결론 및 토론

- 각 시너지들의 최적화 전, 후 엔트로피는 유의미하게 차이가 있었고 이는 비선형 솔버가 정상적으로 작동하여 원하는 해를 찾았음을 의미한다.
- 최적화 후 시너지 벡터들이 boundary close 조건을 더 잘 만족하지만, 전과 후 시너지 벡터들간의 통계적인 유의미한 차이가 있지는 않았다.
- 최적화를 통해 얻은 새로운 시너지 행렬이 기존과 유의미한 차이를 보이면서 NMF분해의 고유성을 만족할 새로운 접근이 필요하다.