

뇌 신경 자극 의료기기를 위한 최적화된 발생 자기장 측정 방법

김정원, 신현수, 이성온*

한양대학교

rkems1995@hanyang.ac.kr, shs2316@hanyang.ac.kr, *sungon@hanyang.ac.kr

An Optimized Measurement Method for the Magnetic Field Generated by Neural Stimulation Medical Devices

Jeongwon Kim, Hyunsoo Shin, Sungon Lee*

Hanyang Univ.

요약

본 논문은 뇌 신경 자극기로부터 발생하는 3차원 자기장의 분포 데이터를 수집하는 데 있어 전 범위 측정과 비교하여 유사한 정확도를 유지하며 짧은 시간에 측정을 수행할 수 있는 BPP 알고리즘을 제안한다. BPP 알고리즘은 너비우선탐색과 Path planning, Pruning 기법을 조합하여 새롭게 개발한 알고리즘으로 전 범위 측정을 포함한 세 가지 방식을 비교하였으며 전체 측정에 걸린 시간과 결과물에 대한 피어슨 상관계수를 사용한 비교를 진행하였다. 최종적으로 BPP 알고리즘은 가장 빠른 측정시간과 자극기 중심의 영역에서 높은 피어슨 상관계수를 보여주었다. 이렇게 제안된 알고리즘은 짧아진 측정시간을 통해 단순 자극기의 자기장 분포 확인뿐만 아니라 이상 자기장 관측이나 자극기 개발 실험 등 여러 분야에 도움이 되리라 생각한다.

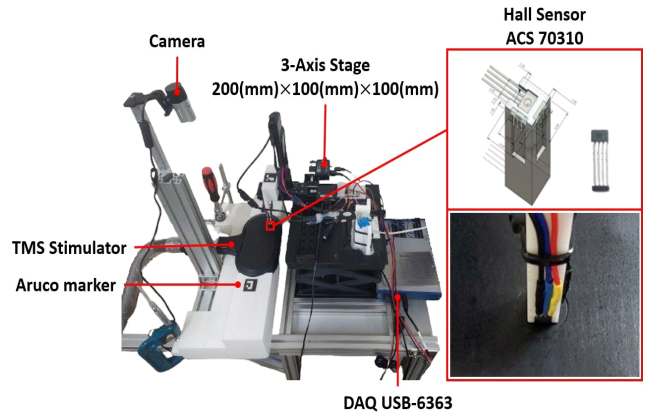
I. 서론

인체의 치료에 있어 약물이나 수술과 달리 비침습적으로 뇌의 신경을 자극하여 질병을 치료하는 방법이 있다. 이러한 비침습적 치료의 대표적인 예시로는 경두개자극술(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)이 있으며 해당 치료 방법은 우울증, 뇌졸중 등의 치료에 효과적인 것으로 알려져 있다. 정확한 자극기 활용을 위한 Solver로 SimNIBS[1]와 같은 FEM 기반의 시뮬레이터가 있으며 해당 시뮬레이터에서 사람의 뇌에 해당하는 데이터는 MRI 촬영을 통한 파일을 시뮬레이터에 입력할 수 있지만 자극기로부터 발생하는 자기장에 대한 데이터는 잘 알려지지 않았으며 몇몇 논문을 통해 알려진 데이터 세트만이 존재할 뿐이다. 뿐만 아니라 자극기 제작과정에서 발생하는 오차 또한 고려할 때 현재 사용하는 자극기의 이론상 자기장 데이터 세트가 실제 기기의 데이터 세트와 같을지 또한 확인할 필요가 있다. 자극기로부터 발생하는 자기장을 측정하기 위해 가장 간단하고 정확한 방법은 선형탐색 알고리즘 기반의 전 범위 측정이 될 것이다. 하지만 이 방법은 시간이 너무 많이 걸린다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 측정 결과의 품질을 최대한 유지하며 측정시간 단축을 위해 Breadth-first search 알고리즘과 Path planning, Pruning 기법을 조합해 새롭게 개발한 BPP 알고리즘을 제안한다. 해당 방법을 선형탐색 전 범위 측정 방법과 기존의 자기장 측정 알고리즘과의 비교를 통해 뇌 신경 자극 의료기기의 최적화된 자기장 측정 방법을 탐구하고자 한다[2].

II. 본론

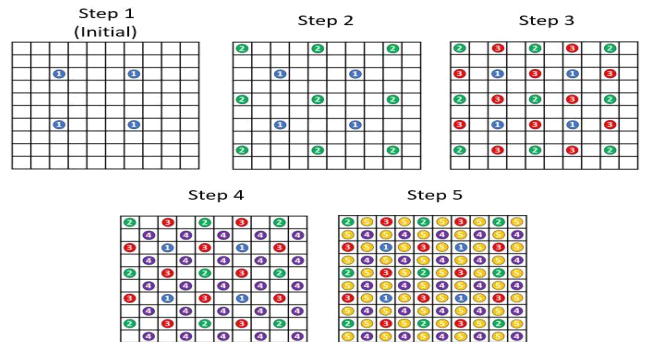
2.1 실험구성

본 실험 구성은 <Fig. 1>과 같다. ALLEGRO 사의 ACS 70310 홀센서 3개를 각 축이 교차하게 구성하고 해당 센서들을 3차원 위치로 이동시켜 Zaber 사의 3축 Stage와 고정, NI 사의 USB-6363 DAQ 장비를 통해 각 센서의 신호들을 샘플링 하였다. 최종 데이터와 자극기의 위치를 정합하기 위해 자극기와 센서 부에 마커(Aruco marker)를 부착하고 카메라를 통해 위치 및 방향을 기록하였다. 해당 실험에 사용된 자극기로는 Remed 사의 TAMAS 제품을 사용하였다.



<Fig. 1> 실험 환경 구성

2.2 SSAS 알고리즘 (Sequential Spatial Adaptive Sampling)

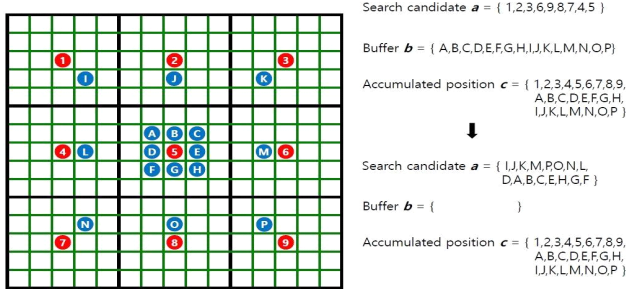


<Fig. 2> SSAS 알고리즘의 단계별 진행

Sequential Spatial Adaptive Sampling (SSAS) 알고리즘은 일정 영역의 변화량을 기준으로 해당 영역의 측정 밀도를 다르게 측정하는 샘플링 알고리즘이다[2]. 1단계에서는 격자의 형태로 조사를 진행한다. 다음 단계로 넘어갈 때 다음 점을 측정할지 예측과 판단을 진행한다. 예측은 <Fig. 2>의 그림과 같이 이전 단계에서 진행한 점들 중심에 대하여 주변 값과의 조화평균을 통해 예측을 진행하며, 이전 단계에서 측정한 주변값

과 측정된 지점 사이의 가장 큰 변화량이 결정 기준보다 큰지 아닌지를 판별하여 해당 요소의 측정을 결정한다[2]. SSAS 알고리즘은 변화량이 적은 부분은 생략하여 기준보다 샘플링 수가 줄어서 상대적으로 적은 측정시간을 갖게 된다. 측정을 진행하지 않아 비어있는 부분에 대해서는 Kriging Interpolation이 적용되었다[2]. 본 연구에서 제안된 방법의 성능을 비교하기 위해 SSAS 알고리즘을 통해 Z축으로 4mm씩 16개의 구간에 대해 3차원의 데이터 세트를 구축하였다.

2.3 BPP 알고리즘(Breadth-first search+Path planning+Pruning)



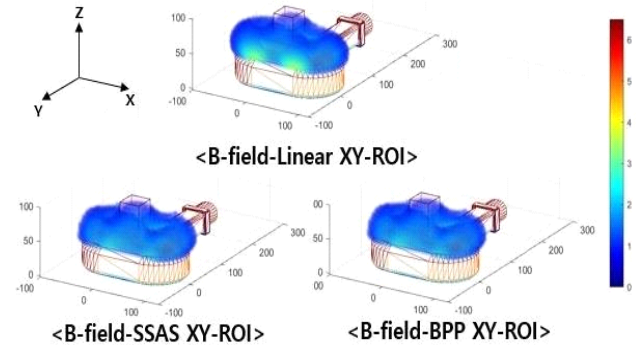
<Fig. 3> BPP 알고리즘의 진행 과정

BPP 알고리즘은 Breadth-first search와 Path planning, Pruning 기법을 조합하여 새롭게 개발한 자기장 측정 알고리즘으로 SSAS 알고리즘과 달리 절댓값을 기반으로 측정을 결정한다. 해당 알고리즘은 <Fig. 3>에 있는 탐색 후보지 a, 후보지 주변 측정 b, 이전까지의 측정을 진행한 모든 좌표정보 c 세 종류의 데이터를 수집한다. 먼저 Pruning의 기준은 gradient 방식의 탐색으로 측정된 0층의 최대치의 절반 값으로 설정하였다. 이는 자기장의 초점공식이 전체 적용영역의 절반 거리라 알려져 있고 자기장의 크기는 거리가 증가함에 따라 로그함수의 형태로 작아져서 초점까지의 데이터를 측정하기에 충분하기 때문이다. 최초로 전체 측정 평면을 9등분으로 나누어 그 중심점을 측정한다. <Fig. 3> 과 같이 1~9번의 9개의 점은 Path planning을 통해 최적의 경로 순서로 배치되어 후보지 a와 측정을 진행한 모든 좌표 c에 입력된다. 후보지 a의 순서대로 해당 좌표의 주변 8개의 좌표를 탐색할 때 Pruning 과정을 통해 측정을 진행한 결과값이 기준값보다 크다면 b와 c에 입력이 되며 그렇지 않다면 c에만 입력이 된다. 또한 탐색을 진행할 좌표가 c에 존재한다면 해당 지점은 이미 측정을 진행한 지점이므로 넘어가게 된다. 그렇게 데이터 a의 모든 요소의 주변값을 모두 측정하고 기준에 충족하는 점들이 <Fig. 3>의 파란색 점과 같다면 데이터 b에 A~P의 점들이 입력될 것이다. 다음 단계로는 b의 좌표들을 Path planning 과정을 통해 최적의 경로 순서로 배치 후 a에 대체되며 b는 비어있는 값으로 초기화된다. 이 과정이 반복되면 데이터 c는 점점 늘어나게 될 것이며 그에 따라 넘어가게 되는 점들이 많아지게 되고 b에 수집되는 데이터는 줄어들 것이다. 더는 b에 데이터를 수집할 수 없을 때 측정은 종료된다. 이러한 알고리즘을 0층부터 15층까지 4mm씩 z축 stage를 이동해가며 3차원의 데이터 세트를 구축하였다. BPP 알고리즘은 기준값 k 보다 작은 점들이 분포한 영역으로는 접근을 하지 않아 전체적으로 측정할 점의 수가 줄어들고 그에 따라 전체 측정시간이 단축된다. 마찬가지로 측정을 진행하지 않은 비어있는 값들에 대해서는 Kriging interpolation이 적용되었다.

2.4 실험 결과

세 가지 측정 알고리즘을 통한 자기장 분포도는 <Fig. 4> 와 같다. 측정 정확도를 평가하기 위해 시간 소모가 가장 크지만 정확한 선형탐색 방식을 기준으로 SSAS 방법과 제안된 BPP 방법을 비교하여 피어슨 상관계수를 구하였다. 전체 영역에서 피어슨 상관계수가 각각 0.9109, 0.9681로

선형탐색 방법과 유사하게 나왔으나 SSAS 알고리즘의 결과물이 약간 더 높게 나왔다. 그러나 <Table. 1>과 <Fig. 4>에서 볼 수 있듯이 자극기의 중심영역(36×36mm) 즉, ROI 영역에 대한 피어슨 상관계수는 BPP 알고리즘의 결과물이 더 높게 나왔으며 측정에 걸리는 시간효율 역시 BPP 알고리즘이 1099.49%로 SSAS 알고리즘보다 약 3배 정도 높게 나왔다.



<Fig. 4> 세 가지 자기장 측정 알고리즘의 x, y축 성분분포 및 자극기 중심의 ROI 영역

	Measurement Time	Time efficiency	Correlation Coefficient	ROI Correlation Coefficient
Linear full sampling	20h 33m 16s	100%	1	1
BPP Algorithm	1h 52m 10s	1099.49%	0.9109	0.9272
SSAS Algorithm	5h 54m 51s	347.54%	0.9681	0.8829

<Table. 1> 세 가지 자기장 측정 알고리즘에 대한 측정시간 및 상관계수 비교

III. 결론

본 논문에서는 뇌 신경 자극기로부터 발생하는 3차원 자기장의 분포 데이터 세트를 수집하는 데 있어 전 범위 측정과 비교하여 유사한 정확도를 유지하며 짧은 시간에 측정을 수행할 수 있는 BPP 알고리즘을 제안하였다. 전 범위 측정은 20시간 이상의 긴 측정시간이 필요하였으며 SSAS 알고리즘의 경우 상대적으로 적은 시간이 소요되었지만, 자극기의 중심영역에서의 피어슨 상관계수가 BPP 알고리즘의 결과보다 작은 수치가 나왔다. 최종적으로 자기장 분포 측정에 있어 가장 정확한 결과를 원한다면 전 범위 측정을, 시간을 어느 정도 단축하며 전체적인 품질을 원한다면 SSAS 알고리즘 방식을, 가장 빠르거나 자극기 중심의 영역에 대한 우수한 품질을 원한다면 BPP 알고리즘 방식을 추천한다는 결론이 도출되었다. 해당 자기장 측정 알고리즘에 의해 짧아진 측정시간은 단순 자극기의 자기장 분포 측정뿐만 아니라 과진류에 의한 특정 부품의 이상 자기장 관측이나 TMS 제품 개발 실험 등 여러 분야에 도움이 되리라 생각한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1A4A3033961)

참고 문헌

- [1] Thielscher A, Antunes A, Saturnino GB. Field Modeling for Transcranial Magnetic Stimulation: A Useful Tool to Understand the Physiological Effects of TMS? 2015. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7318340>
- [2] Serpaud S, Boyer A, Ben-Dhia S, Cocchetti F. Fast and Accurate Near-Field Measurement Method Using Sequential Spatial Adaptive Sampling (SSAS) Algorithm. IEEE Trans Electromagn Compat 2021;63. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3025547F>.