

선추적공식을 이용한 머리전달함수의 회전타원체 형상 모델링

A prolate spheroidal head modeling of head related transfer function based on ray tracing formula

조현† · 박영진* · 박윤식**
Hyun Jo, Youngjin Park and Yونسik Park

Key Words : prolate spheroidal head related transfer function(장구 회전타원체 형상 머리전달함수), head model(머리 모델), ray tracing formula(선추적 공식), interaural time difference(양이간 시간차), Anthropometry (인체 파라미터), HRTF customization(머리전달함수 맞춤화)

ABSTRACT

To customize individual characteristics of HRTF, a spherical model has been used for structural modeling technique. A pseudo-code of prolate spheroidal HRTF caused by incident acoustic point source is already developed, and it can be used a head shadow filter for structural modeling of HRTF. In this research, to see the necessity and efficiency of spheroidal head modeling, ITD optimization is performed on CIPIC HRTF database. From given cost function, ITD-optimized spheroidal head model, whose ITD information is the most matched version of measured ITD information, is found by varying head parameters subject by subject. By comparing results of ITD-optimized spheroids and ITD-optimized spheres, we concluded that a spherical head model is more efficient way of generating head shadow effect than a spheroidal head model does.

1. 서론

가상 입체 음장 생성(3D sound generation)에 있어서 맞춤형 머리전달함수(Customized HRTF)는 더미로부터 측정된 머리전달함수에 비해서 개개인 별 특징을 더 정확히 맞춰 줄 수 있다는 장점을 가진다. 또한 맞춤형 머리전달함수를 사용할 경우, 개인의 머리전달함수(Individual HRTF)를 측정하지 않고도 개개인의 특징을 잘 묘사할 수 있다는 장점이 있다.

맞춤형 머리전달함수를 구현하는 기법 중에서 구조적 모형화(structural model)를 기반으로 한 방식은 피실험자의 귀나 머리, 어깨 등의 치수 변화를 개개인 별로 맞추어 줌으로써, 신체적 치수 차이에 기인한 개개인 별 음장 변화를 그 사람에게 맞게 맞추어 줄 수 있다. (1)

연구자들은 R. O. Duda 가 제안한 구형 머리전달함수를 구조적 모형화의 머리모델로 이용하고 있다. (2) 하지만 CIPIC 머리전달함수 데이터베이스 (3)에서 공개한 인체 파라미터(Anthropometric parameter)에 의하면, 사람의 머리형상은 간단한 구 형상이 아니라 3 축의 길이가 다른 타원체(ellipsoid) 형상에 가깝다. 특히 머리형상에서 머리

의 높이는 머리의 양이간 거리 보다 길기 때문에 이러한 사실에 착안하여 점음원을 음원으로 가지는 회전타원체 형상 머리전달함수의 유도 및 그 계산에 관한 연구가 제안되었다. (4)

의사코드(Pseudo-code)로 제안된 회전타원체 형상 머리전달함수가 구조적 모형화를 기반으로 한 맞춤형 머리전달함수 구현 기법에 적용되기 위해서는 ‘개개인의 인체 파라미터’와 ‘개인의 머리전달함수를 가장 잘 표현할 수 있는 회전타원체 형상’ 간의 통계적 상관관계가 필요하다. 이를 이용할 경우, 인체 파라미터 만으로 그 사람에게 맞는 회전타원체 머리모델을 찾아낼 수 있게 되며 구조적 모형화에 회전타원체 형상 머리모델을 응용할 수 있다.¹

본 논문에서는 CIPIC 머리전달함수 데이터베이스를 이용하여 피실험자의 머리전달함수와 가장 유사한 회전타원체 형상 머리모델을 최적화 과정을 통해 양이간 시간차의 관점에서 살펴보았다. 얻어진 머리형상을 같은 최적화 과정을 거쳐 얻은 구형 머리모델과 비교하여 회전타원체 형상 머리모델이 기존의 구형 머리모델에 비해 양이간 시간차의 관점에서 어떤 차이가 있는지 알아보았다.

† 교신저자; KAIST, 기계항공 시스템 공학부, NoViC.

E-mail : e.w.smagel@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

* KAIST, 기계항공 시스템 공학부, NoViC.

** KAIST, 기계항공 시스템 공학부, NoViC.

¹ 구 형상에 대해서는 인체 파라미터(머리의 높이, 앞뒤간 거리, 양이간 거리)와 구형 머리모델 간의 통계적 상관관계가 보고되었다. (5)

2. 양이간 시간차를 이용한 최적화

전달함수의 관점에서 개인의 머리전달함수와 가장 유사한 회전타원체 형상을 찾는 일은 회전타원체 형상 머리전달함수의 크기정보와 위상정보가 개인의 머리전달함수의 그것들과 가장 유사해지는 특정크기의 회전타원체를 찾는 것이다. C. I. Cheng의 연구결과에 따르면, 머리전달함수에서 머리에 의한 영향이 주를 이루는 주파수 대역은 약 4kHz 미만으로 생각되지만, 그 영역에서는 몸통(torso)에 의한 영향이 복합적으로 섞여 있기 때문에 머리전달함수의 크기정보에서 머리의 영향만이 존재하는 주파수영역은 존재하지 않는다. (6) 따라서 머리전달함수의 크기정보에서 머리형상으로 인한 정보만을 분리하기는 힘들다.

반면, 머리전달함수의 양이간 시간차(ITD, Interaural Time Difference)는 머리전달함수의 위상정보에 해당하며, 음원의 음압이 머리의 형상에 의해 양이간에 돌아들어가게 되는 시간차를 의미한다. 실제로 사람의 머리를 적절히 구나 타원체로 모형화하였을 때 실제 측정된 양이간 시간차와 유사한 형태의 양이간 시간차를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 머리전달함수의 여러 정보 중에서도 양이간 시간차를 이용하여 피실험자의 머리전달함수와 가장 유사한 머리형상을 찾고자 하였다.

3. 양이간 시간차 계산

머리 형상에 대한 양이간 시간차를 수학적인 머리전달함수를 이용하여 계산할 경우, 시간영역에서의 임펄스 응답(HRIR, Head Related Impulse Response)을 이용하거나, 주파수 상에서 그룹지연(Group delay)을 이용해서 구할 수 있다. 하지만 회전타원체 형상 머리전달함수의 경우에는 고주파에서 그 계산량이 증가하기 때문에 양이간 시간차를 계산하기 위해서 머리전달함수를 이용하는 것은 많은 계산량을 요한다.

다양한 형상에 대해서 양이간 시간차를 계산하고 피실험자의 양이간 시간차와 가장 유사한 양이간 시간차를 찾기 위해서는 양이간 시간차를 추정할 수 있는 D. Rösler의 선추적 공식(ray tracing formular)을 이용하여 최적화 과정에 걸리는 시간을 줄일 수 있다. (7), (8)

예를 들어 구형상에 대해서 선추적 공식을 이용할 경우에, 머리전달함수에서 계산한 양이간 시간차 정보와 선추적 공식을 이용해서 계산한 양이

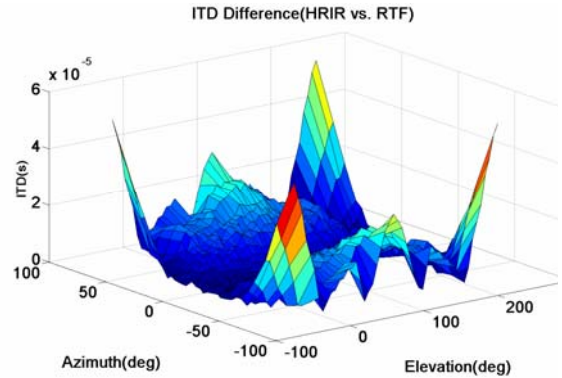


그림 1. 머리전달함수의 임펄스 응답으로부터 구한 양이간 시간차와 선추적 기법을 이용해서 구한 양이간 시간차 간의 차이. 그래프는 양이간 시간차 차이를 절대값으로 나타낸 값이며 사용한 머리형상의 치수는 다음과 같다.

$$a = 0.087m, d_{down} = 0.021m, d_{back} = 0m.$$

간 시간차 간에는 그림 1. 과 같은 차이가 있으며 특히 음원이 고도각이 낮거나, 한쪽 귀로 치우친 경우에 실제 양이간 시간차와의 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다.²

4. 양이간 시간차를 이용한 최적화 과정

CIPIC 머리전달함수 데이터베이스에는 인체 파라미터를 사용할 수 있는 37 명의 피실험자에 대한 머리전달함수가 공개되어있다. 먼저, 37 명의 피실험자들의 양이간 시간차를 머리전달함수의 임펄스 응답으로부터 계산하고³, 머리의 치수를 바꾸어가며 선추적 기법으로부터 양이간 시간차를 계산한 후, 양이간 시간차 오차를 최소화할 수 있는 방향으로 최적화를 수행하였다. 최적해를 구하기 위한 목적함수와 계산된 종속변수는 다음과 같다.

Cost Function :

$$F = \min \left\{ \sum_{azi=-65}^0 \sum_{ele=-28.125}^{208.125} \left| ITD(azi, ele)_{KEMAR} - ITD(azi, ele)_{head\ model} \right| \right\}$$

Variables :

a, d_{down} for spherical model

a, b, d_{down} for spheroidal model

² 수평각을 기준으로 0.1ms의 양이간 시간차 오차는 약 10도의 각도오차를 나타내므로, 그림 1.의 경우, 약 6도의 최고 오차를 보인다고 할 수 있으며, 다양한 형상에 대한 시뮬레이션 결과, 선추적 기법의 양이간 시간차 계산은 실제 양이간 시간차와 큰 차이가 없다.

³ 양이간 임펄스 응답에 대해, 최대값의 20%에 도달하는 시점 간의 시간 차로 계산하였다.

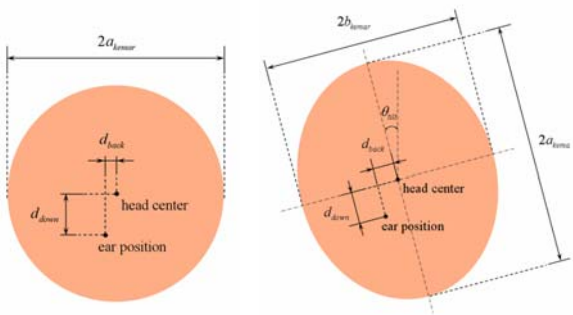


그림 2. 머리모델에 사용된 구(좌) 및 회전타원체(우)

목적함수에서 계산하게 되는 양이간 시간차는 방위각이 -65도에서 0도까지 바뀌는 ‘한 쪽 면’만 고려한다. 이는 실제 측정된 양이간 시간차가 방위각 0도를 중심으로 비대칭이기 때문이며 이러한 현상은 양귀의 비대칭성 때문이다.

참고로 선추적 공식의 양이간 시간차가 실제 값이랑 오차가 크게 되는, -80도에 해당하는 방위각과 -45도, 230.625에 해당하는 고도각은 목적함수에서 제외하였다. 또한 최적해는 1mm, 1도의 해상도로 파라미터를 바꾸어가며 찾았다.

최적화 과정에서 d_{back} 과 θ_{tilt} 는 제외하였다. d_{back} 의 경우, CIPIC 머리전달함수 데이터베이스의 인체 파라미터도 수 밀리미터 단위에 불과한 것을 알 수 있으며 실제로 d_{back} 을 고려하여 최적화를 수행하더라도 구해진 파라미터는 몇몇 피실험자를 제외하고 0 값을 가지기 때문에 제외하였다. 또한 θ_{tilt} 의 경우, 구해진 최적해에 대한 민감도 해석을 통해 다른 파라미터에 비해서 양이간 시간차 변화에 가장 적은 영향을 주는 것으로 확인되었으며 마찬가지로 θ_{tilt} 를 고려하더라도 모든 피실험자들은 θ_{tilt} 가 0이 나온다.

5. 최적화 결과

최적화 결과는 그림 3. 에 나타난 바와 같다. 측정된 양이간 시간차와 머리형상에 대한 양이간 시간차를 가장 잘 맞춰줄 수 있도록 최적화를 수행하면, 구의 결과와 회전타원체의 결과 간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 양이간 시간차의 관점에서는 굳이 회전타원체를 이용하여 머리의 높이변화를 고려하지 않아도 된다. 표 1., 표 2. 는 최적화로부터 얻어진 머리형상을 각각의 피실험자들에 대해 표로 나타내고 있다. 37명 중 18명의 경우에, 회전타원체로 최적화를 하더라도 최적해는 구의 형상을 가지는 피실험자가 있음을

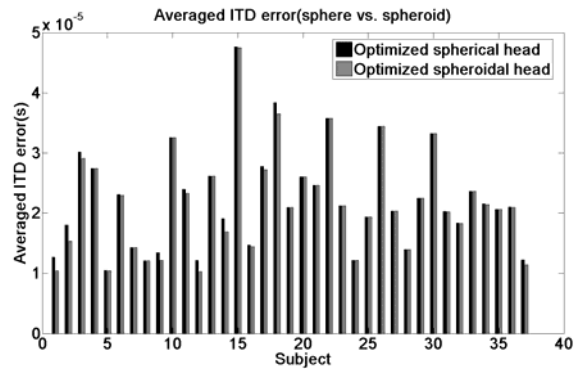


그림 3. 최적화 과정을 통해 구해진 구 및 회전타원체 형상 머리모델 간의 양이간 시간차 오차 비교.

확인할 수 있다.

표 3. 은 인체 파라미터와 구해진 머리형상 간의 통계적 상관관계가 있는지 확인하기 위하여, 최적화 과정을 통해 구해진 d_{down} 값과 인체 파라미터를 비교한 결과이다. 귀의 오프셋에 대한 실제 피실험자 별 인체 파라미터는 3mm 정도의 평균 값과 0.6mm 정도의 표준편차를 가지지만, 머리형상 모델의 경우에는 인체 파라미터와 비교해 볼 때, 표준편차가 인체 파라미터 보다 더 커지는 것을 알 수 있다. 구형 모델보다 회전타원체 모델의 경우에 평균 값과 표준편차가 줄긴 하지만, 굳이 회전타원체를 사용하는 것 보다는 귀의 평균 오프셋을 사용하는 것이 피실험자의 귀 오프셋을 더 잘 맞출 수 있음을 알 수 있다. 따라서 귀의 오프셋의 경우에 인체 파라미터와 양이간 시간차로부터 구한 최적해 간의 통계적 상관관계가 없다.

	Mean(mm)	Std.(mm)
Anthropometry	3.0065	0.5941
Spherical model	1.2342	0.9655
Spheroidal model	0.9485	0.7556

표 3. 피실험자 별 d_{down} 값에 대한 비교. 첫 번째 줄은 인체 파라미터의 평균과 표준편차 값이고, 두 번째 줄은 구에서 구해진 d_{down} 값과 인체 파라미터 간의 차이이며, 세 번째 줄은 회전타원체에서 구해진 d_{down} 값과 인체 파라미터 간의 차이이다.

Subject number	Radius(m)	Downward ear offset(m)	Backward ear offset(m)
3	0.097	0.047	0.001
10	0.098	0.066	0.001
18	0.087	0.049	0.001
20	0.091	0.034	0.001
21	0.088	0.04	0.001
27	0.086	0.041	0.001
28	0.083	0.035	0.001
33	0.084	0.036	0.001
40	0.09	0.052	0.001
44	0.087	0.013	0.001
48	0.097	0.064	0.001
50	0.097	0.048	0.001
51	0.084	0.036	0.001
58	0.089	0.036	0.001
59	0.087	0.001	0.001
60	0.084	0.037	0.001
61	0.088	0.046	0.001
65	0.098	0.06	0.001
119	0.078	0.033	0.001
124	0.083	0.031	0.001
126	0.075	0.027	0.001
127	0.081	0.03	0.001
131	0.087	0.036	0.001
133	0.082	0.026	0.001
134	0.084	0.035	0.001
135	0.082	0.034	0.001
137	0.085	0.035	0.001
147	0.085	0.036	0.001
148	0.078	0.032	0.001
152	0.088	0.033	0.001
153	0.085	0.036	0.001
154	0.084	0.041	0.001
155	0.078	0.017	0.001
156	0.085	0.041	0.001
162	0.086	0.03	0.001
163	0.086	0.037	0.001
165	0.086	0.039	0.001

표 1. 구 형상에 대한 선추적 공식을 이용하여 피실험자의 양이간 시간차가 측정된 양이간 시간차와 가장 일치하는 머리의 형상. $d_{back} = 0.001$ 로 설정하였다.

Subject number	Major/2 (m)	Minor/2 (m)	Downward ear offset(m)	Backward ear offset(m)	Head tilt(deg)
3	0.105	0.088	0.016	0.001	0
10	0.112	0.076	0.018	0.001	0
18	0.104	0.074	0.001	0.001	0
20	0.091	0.091	0.034	0.001	0
21	0.089	0.087	0.038	0.001	0
27	0.087	0.082	0.034	0.001	0
28	0.083	0.083	0.035	0.001	0
33	0.084	0.083	0.035	0.001	0
40	0.094	0.08	0.033	0.001	0
44	0.087	0.087	0.013	0.001	0
48	0.101	0.08	0.036	0.001	0
50	0.104	0.088	0.025	0.001	0
51	0.084	0.084	0.036	0.001	0
58	0.102	0.083	0.011	0.001	0
59	0.095	0.082	0.001	0.001	0
60	0.087	0.082	0.035	0.001	0
61	0.095	0.077	0.016	0.001	0
65	0.123	0.08	0.001	0.001	0
119	0.078	0.078	0.033	0.001	0
124	0.083	0.083	0.031	0.001	0
126	0.075	0.075	0.027	0.001	0
127	0.081	0.081	0.03	0.001	0
131	0.087	0.087	0.036	0.001	0
133	0.082	0.082	0.026	0.001	0
134	0.084	0.084	0.035	0.001	0
135	0.082	0.082	0.034	0.001	0
137	0.085	0.085	0.035	0.001	0
147	0.085	0.085	0.036	0.001	0
148	0.078	0.078	0.032	0.001	0
152	0.088	0.088	0.033	0.001	0
153	0.086	0.084	0.035	0.001	0
154	0.085	0.082	0.039	0.001	0
155	0.078	0.078	0.017	0.001	0
156	0.086	0.081	0.035	0.001	0
162	0.086	0.086	0.03	0.001	0
163	0.088	0.085	0.036	0.001	0
165	0.09	0.082	0.031	0.001	0

표 2. 회전타원체 형상에 대한 선추적 공식을 이용하여 피실험자의 양이간 시간차가 측정된 양이간 시간차와 가장 일치하는 머리의 형상. $d_{back} = 0.001$, $\theta_{int} = 0$ 으로 설정하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 양이간 시간차를 이용하여 측정된 머리전달함수의 양이간 시간차와 가장 유사한 회전타원체 형상 머리모델을 찾고 회전타원체 형상 머리모델의 효용성을 확인하고자 하였다. 최적화 과정을 통하여 분석한 결과, 양이간 시간차의 관점에서는 구와 회전타원체 간의 성능차이가 거의 없었다. 또한 귀의 오프셋의 경우에는 구형 머리모델과 회전타원체 형상 머리모델 모두 인체 파라미터와의 통계적 상관관계가 없었다. 전달함수의 관점에서 머리전달함수의 위상정보는 구형 머리모델 만으로도 충분히 표현 가능하다. 머리형상의 경우에는 2 차적 음원 인식 정보(secondary sound source localization cue)를 제공하며 (9) 회전타원체 형상 머리전달함수의 경우, 구형 머리전달함수에 비해 대단히 많은 계산량이 요구되기 때문에 구 형상을 이용하는 것이 효율적인 머리모델을 구현하는데 적합하다. 따라서, 구조적 모형화(structural model)를 기반으로 한 맞춤형 머리전달함수 구현에서는 구형 머리모델을 사용하되, 귀의 오프셋을 고려할 때에는 피실험자들 간의 평균 오프셋을 이용하는 것이 바람직하다.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업(M1050000 0112-05J0000-1121), 두뇌 한국 21 프로젝트의 일환으로 수행하였음.

참고문헌

- (1) C. P. Brown and R. O. Duda, 1998, "A structural model for binaural sound synthesis", IEEE transactions on speech and audio processing, Vol. 6, No. 5, pp. 476-488.
- (2) R. O. Duda and W. L. Martens, 1998, "Range dependence of the response of a spherical head model", Journal of Acoustical Society of America. Vol.104, No.5, pp.3048-3058.
- (3) CIPIC HRTF database files, released 1.1, August 21, 2001, CIPIC Interface Laboratory, U. C. Davis. (<http://interface.cipic.ucdavis.edu/>)
- (4) Hyun Jo, Youngjin Park and Younsik Park, 2007, "Comparison between a spherical head model and a prolate spheroidal head model used in HRTF customization", KSNVE, 07A-37-03.
- (5) V. R. Algazi, C. Avendano and R. O. Duda, 2001, "Estimation of a spherical-head model from anthropometry", J. Aud. Eng. Soc., Vo. 49, No. 6, pp. 472-478.
- (6) C. I. Cheng and G. H. Wakefield, 1999, "Spatial

frequency response surfaces (SFRS's): An alternative visualization and interpolation technique for head-related transfer functions (HRTF's)", AES 16th International Conference, pp. 147-159.

(7) D. Röser, 1965, "Schallrichtungsbestimmung bei krankhaft verändertem Gehör", Dissertation, Technische Hochschule, Aachen.

(8) D. Röser, 1966, "Der Einfluss der Entfernung auf das Richtungshören", Arch. klin. u. exp. Ohren-Nasen-Kehlkopfheilk. Vol.186, pp.356-364.

(9) M. B. Gardner, 1973, "Some monaural and binaural facets of median plane localization", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 54, No. 6, pp. 1489-1495.