

# Estimação da orientação de uma fonte acústica direcional com um arranjo de dois microfones

Alberto Yoshihiro Nakano e Phillip Mark Seymour Burt

**Resumo**—Um modelo simples que consiste em uma fonte pontual deslocada de seu centro de rotação em associação com um modelo empírico de diretividade, que considera a emissão da energia emitida na parte posterior da fonte, é considerado para o estudo do problema da estimação da orientação de uma fonte acústica direcional. Verificamos que quando a diferença de tempos de chegada de sinais é levada em consideração, um arranjo simples de dois microfones é suficientemente robusto contra fatores como a diretividade dos microfones e uma reverberação branda. Isto é demonstrado comparando-se valores teóricos e medidos de atributos biaurais e monoaural (energia) como entradas de uma rede neural artificial (RNA) empregada para estimação da orientação da fonte acústica.

**Palavras-Chave**—Estimação de orientação de fonte, atributos biaurais, arranjo de microfones, rede neural artificial

**Abstract**—A simple physical model consisting of a point source displaced from its center of rotation, in combination with a directivity model that includes backwards emitted energy are considered for the problem of estimating the orientation of a directional acoustic source. We show, however, that when the time difference of arrival is also taken into account, a small array of only two microphones is sufficiently robust against unaccounted factors such as microphone directivity variation and mild reverberation. This is shown by comparing predicted and measured values of binaural cues, and by using them and pairwise frame energies as inputs for an artificial neural network (ANN) in order to estimate source orientation.

**Keywords**—Source orientation estimation, binaural cues, microphone array, artificial neural network

## I. INTRODUÇÃO

A estimação da orientação de uma fonte acústica direcional, como a cabeça humana, tem ganhado interesse em aplicações como robôs inteligentes [1], controle de dispositivos em ambientes inteligentes [2], controle automático de cadeira de rodas [3], aquisição de sinais de voz em ambientes reverberantes [4] e aquisição de sons 3D de alta fidelidade [5].

Arranjos de microfones com dezenas ou até centenas de microfones têm sido usados para estimação da orientação de fontes acústicas [6], [7], [8], [9], usualmente como um complemento para o problema da localização de fonte acústica [10], [11], [12] e rastreamento [13], [14], [15]. Recentemente, abordagens biaurais para localização de fonte acústica têm sido exploradas [16], [17], [18], [19], [20], entretanto, não

estudando o problema da estimação da orientação de fonte acústica.

A orientação da cabeça de locutores em um ambiente inteligente afeta a qualidade dos sinais gravados por microfones distantes e, conseqüentemente, influencia o desempenho das tecnologias baseadas nesses sinais [11]. Com a informação relativa à orientação, diversos serviços multimodais podem ser desenvolvidos, tornando a estimação da orientação um tópico de pesquisa interessante.

Nos casos em que arranjos de centenas de microfones são considerados, [6], [9], a estimação da orientação da fonte é baseada na diretividade da fonte e na intensidade dos sinais, embora em [8] verificou-se que considerando também a diferença dos tempos de chegada de sinais em pares de microfones um aumento significativo na estimação da orientação da fonte era alcançado.

Arranjos de microfones possibilitam robustez contra fatores como a direcionalidade dos microfones e o efeito da reverberação na aquisição de sinais. Neste trabalho, objetivando a praticidade e a simplicidade, consideramos um arranjo de apenas dois microfones e investigamos o uso de conceitos relacionados aos atributos biaurais, a diferença interaural de tempos (*interaural time difference* – ITD) e a diferença interaural de intensidades (*interaural level difference* – ILD) para estimação da orientação de uma fonte acústica direcional por meio de redes neurais artificiais (RNAs). A seguir uma visão geral do método proposto é apresentado.

As variações observadas nos atributos biaurais, ITD e ILD, causadas pela variação na orientação da fonte são abordadas por um modelo simples, composto de uma fonte pontual que é rotacionada e um par de microfones. Um novo modelo empírico para modelagem da diretividade da fonte acústica, responsável pela variação de ILD, é apresentado. Quanto à variação de ITD, ela ocorre quando a fonte pontual não coincide com o seu centro de rotação. O modelo que demonstra estas relações é derivado utilizando funções trigonométricas básicas. No problema analisado, os valores teóricos e medidos demonstram a existência de uma ambigüidade na estimação da orientação se apenas ILD ou ITD forem utilizados na estimação. A inclusão das energias dos sinais (atributo monoaural) como atributo no processo de estimação se mostrou eficaz para solucionar essa ambigüidade. Finalmente, a estimação por quadro e multiquadro são considerados, sendo que o caso multiquadro seria a escolha natural em um caso prático em aplicações por comandos de voz.

Este artigo é organizado da seguinte forma: na Seção II apresentamos um modelo de irradiação simples de uma fonte direcional, na Seção III apresentamos os modelos físicos da

Alberto Yoshihiro Nakano, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Toledo, Toledo-PR, Brasil, E-mail: nakano@utfpr.edu.br; Phillip Mark Seymour Burt, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle (PTC) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo-SP, Brasil, E-mail: phillip@lcs.poli.usp.br. Este trabalho tem apoio da Fundação Araucária e FAPESP (2010/18180-7).

ITD e da ILD, respectivamente. Na Seção IV apresentamos a configuração experimental. Na Seção V apresentamos os resultados e as conclusões finais são apresentadas na Seção VI.

## II. FONTE ACÚSTICA DIRECIONAL

Um altofalante DS-7 (fabricante Roland) foi utilizado como fonte acústica direcional. Por uma questão de simplicidade, nós assumimos que o diagrama de irradiação da fonte é dado por um modelo empírico representado abaixo

$$D(\phi, k, J) = \frac{k + \cos^{2J}(\phi/2)}{k + 1}, \quad (1)$$

onde  $\phi$  é o ângulo em azimute em relação à direção de maior diretividade da fonte,  $k$  e  $J$  controlam a diretividade ( $J = 0$  nos leva a um padrão omnidirecional enquanto  $J > 0$  nos leva para um padrão direcional; e  $k > 0$  garante que  $D(\phi = 180^\circ, k, J) > 0$ ). Este modelo empírico melhora o modelo básico de emissão cardióico, como o apresentado em [21], incluindo a energia emitida em  $\phi = 180^\circ$  que é controlado por  $k$ .

Na Figura 1, o diagrama de irradiação medido da fonte é comparado com o do modelo com  $k = 0,05$  e  $J = 3$ . Adicionalmente, o diagrama medido da fonte é similar ao diagrama de irradiação da cabeça humana [7], que é o caso de maior interesse neste estudo.

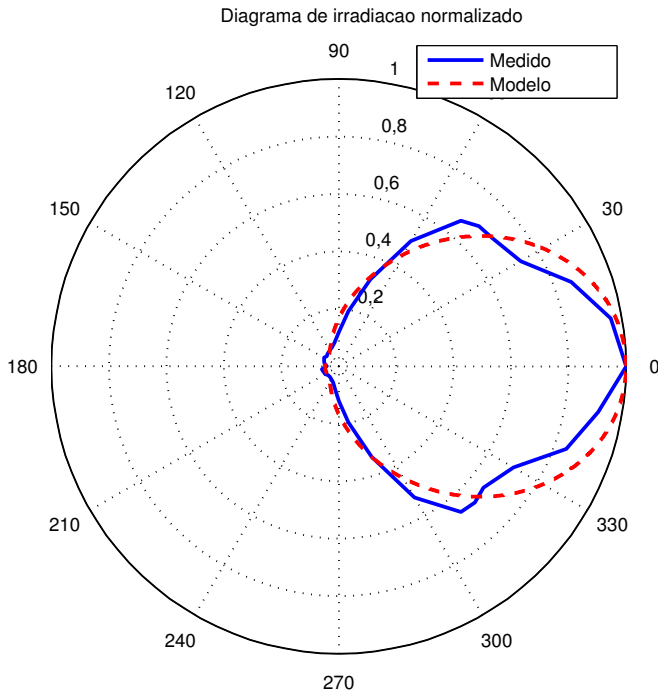


Fig. 1. Diagrama de irradiação medido e teórico para o altofalante.

## III. MODELOS FÍSICOS PARA ILD E ITD

Como modelo simples consideramos uma fonte pontual a uma distância  $\rho$  do seu centro de rotação e com um ângulo de orientação  $\theta$  (veja Figura 2). A situação é análoga a um locutor

humano sendo  $\rho$  a distância entre a boca e o pescoço. Além disso, nesta análise assumimos o caso ideal sem reverberação e microfones omnidirecionais idênticos.

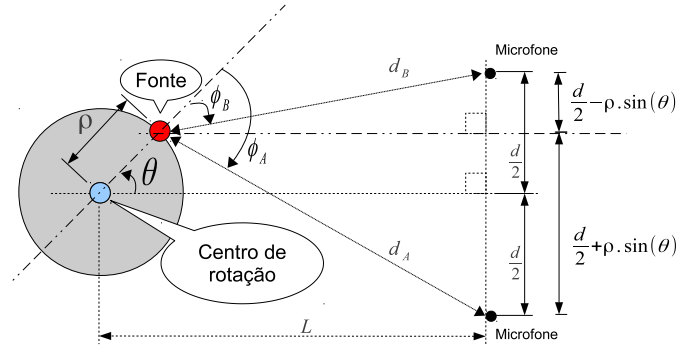


Fig. 2. Modelo físico: fonte pontual não coincidindo com o centro de rotação.

A partir deste modelo, o ILD para um arranjo de dois microfones é dado por

$$ILD(dB) = D_{dB}(\phi_A, k, J) - D_{dB}(\phi_B, k, J), \quad (2)$$

onde  $D_{dB}(\phi, k, J) = 10 \log_{10} D(\phi, k, J)$ , e varia com  $\phi_A = \phi_A(\rho, \theta)$  e  $\phi_B = \phi_B(\rho, \theta)$  (veja Figura 2). Para um arranjo de microfones separados por  $d = 13,6$  cm e posicionado simetricamente a uma distância de  $L = 1,0$  m da fonte, os valores de ILD para três valores de  $\rho = \{0, 2, 13\}$  cm em função da orientação  $\theta$  são apresentados na Figura 3a. Com mesmo modelo da Figura 2, o ITD, por sua vez, é dado por

$$ITD(s) = \frac{d_A(\rho, \theta) - d_B(\rho, \theta)}{c}, \quad (3)$$

sendo que

$$d_A^2(\rho, \theta) = \left(\frac{d}{2} + \rho \sin(\theta)\right)^2 + (L - \rho \cos(\theta))^2, \quad (4)$$

$$d_B^2(\rho, \theta) = \left(\frac{d}{2} - \rho \sin(\theta)\right)^2 + (L - \rho \cos(\theta))^2, \quad (5)$$

são as distâncias da fonte para os microfones, e  $c$  é a velocidade do som. Considerando-se as mesmas condições anteriores, os valores de ITD em função de  $\theta$  são apresentados na Figura 3b, para os mesmos valores de  $\rho$  usados no ILD, em número de amostras  $ITD(amostra) = f_s \cdot ITD(s)$ , onde  $f_s$  é a frequência de amostragem. Note que ITD é mais dependente de  $\rho$  que ILD.

Como pode ser observado pelos gráficos de ILD e ITD na Figura 3, cada um destes atributos poderia ser utilizado para estimar a orientação  $\theta$  da fonte, embora exista uma ambiguidade entre os intervalos  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  e  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  e também entre  $180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$  e  $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ . Esta questão será examinada em mais detalhes na Seção V. Por enquanto, notamos que a falta do ITD em trabalhos passados na literatura como meio de estimar a orientação da fonte é possivelmente devido ao fato de se considerar uma fonte pontual em seu próprio centro de rotação ( $\rho = 0$ ), situação na qual o ITD é sempre constante, não variando com a orientação da fonte.

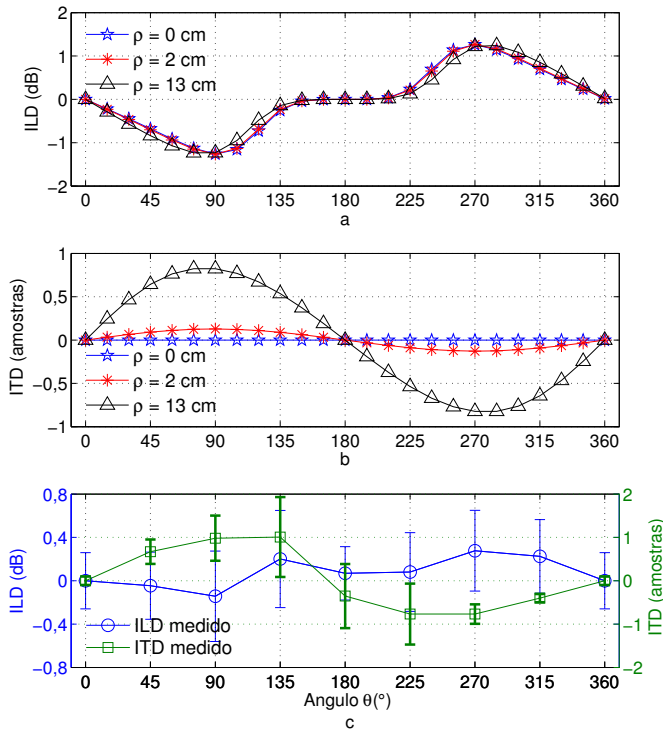


Fig. 3. Valores medidos e do modelo teórico de ILD e ITD, em função da orientação  $\theta$ . (a) Modelo do ILD; (b) Modelo do ITD; (c) Valores medidos de ILD e ITD (média e desvio padrão).

#### IV. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A Figura 4 ilustra o processo de estimação dos atributos biaurais.  $s(t)$  representa amostras de voz limpa,  $h_l(t)$  e  $h_r(t)$  representam a resposta impulsiva biaural medida, os índices  $l$  e  $r$  representam os microfones esquerdo e direito do arranjo,  $\hat{x}_l(t)$  e  $\hat{x}_r(t)$  representam as amostras criadas artificialmente, e  $\hat{x}_l$  e  $\hat{x}_r$  representam os pares de quadros usados para se estimar ITD e ILD.

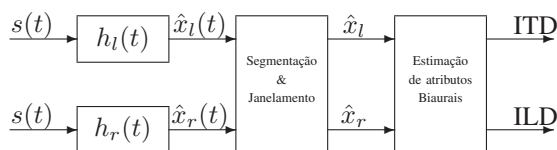


Fig. 4. Estimação dos atributos biaurais ITD e ILD.

Rede neural artificial (RNA), do inglês *artificial neural network* (ANN), é uma estrutura distribuída com um mapeamento entrada-saída que possui a capacidade de aprender e adaptar-se a diferentes condições, modelando os efeitos dos fenômenos físicos responsáveis pela geração dos dados de entrada [22].

O procedimento adotado consiste em utilizar os atributos biaurais como parâmetros de entrada na(s) RNA(s) que mapeiam este(s) valor(es) de entrada para cada uma das saídas consideradas. As simulações contaram com RNAs do tipo “feedforward” com uma entrada (considerando ILD ou ITD) ou três entradas (considerando ITD e energia dos pares de quadros E), uma camada oculta e oito saídas cada uma cor-

respondendo a uma das orientações consideradas. O conjunto de dados disponível foi subdividido em três subconjuntos, 60% foi usado como subconjunto de treinamento, 20% como subconjunto de validação e 20% como subconjunto de teste. Validações cruzadas foram realizadas permutando-se o conjunto total de dados. Duas medidas foram utilizadas para medir a performance das RNAs, a taxa de acertos (TA), quando a orientação estimada corresponde à orientação correta, e o erro de orientação médio (EOM), que expressa o erro angular médio entre a orientação estimada e a orientação correta.

É importante mencionar que o algoritmo de estimação não exige nenhuma informação *a priori* sobre os parâmetros da Figura 2. Porém, na fase de treinamento a RNA necessita da correta orientação no algoritmo de treinamento.

Os experimentos foram realizados em uma sala a prova de som de 3,0 m de comprimento, 2,7 m de largura e 3,0 metros de altura. O tempo de reverberação medido  $T_{60}$  foi próximo de 130 ms. O ruído de fundo medido foi menor que 30 dB (escala A). O altofalante foi posicionado sobre uma mesa giratória com 360° de liberdade a 1,0 m do chão. A distância entre o eixo de rotação da mesa e a frente de emissão do altofalante é de  $\rho = 13$  cm. O arranjo foi montado com dois microfones omnidirecionais Le Son separados por  $d = 13,6$  cm, 1,0 m acima do chão e  $L = 1,0$  m distante do altofalante. Um dispositivo com conversores A/D e D/A (Edirol FA-101) operando com frequência de amostragem de 48,0 kHz foi usado para reprodução e gravação.

Para cada uma das 8 orientações consideradas (45° de diferença entre as orientações consideradas), uma resposta impulsiva biaural foi medida [24], [25], subamostrada para 16 kHz e então convoluída com amostras do banco de dados TIMIT (2 amostras de 5 homens e 5 mulheres).

Na análise foram utilizados quadros com 256 amostras, deslocamento de quadros de 128 amostras, janela de Hamming, ITDs foram obtidos usando-se a função GCC-PHAT [10]. ILDs foram estimados a partir da razão da energia dos quadros. Todo o processamento foi realizado usando-se MatLab.

#### V. RESULTADOS

##### A. Estimação por quadro

As médias e desvios padrões dos ILDs e ITDs por orientação da fonte acústica são apresentados na Figura 3c. Pode ser visto que o ITD é mais robusto que o ILD em relação a fatores que não são levados em consideração em nosso modelo físico, como a diretividade dos microfones e a reverberação. Uma análise das estatísticas do ITD reforça a possibilidade de utilizá-lo para a estimação automática da orientação. Assim, baseando-se em trabalhos passados [2], [8], a análise foi restrita ao estudo da estimação da orientação da fonte acústica por meio de RNAs.

Consistente com a maior robustez do ITD, usando-o como atributo na RNA temos um desempenho superior comparado com o ILD, como pode-se observar na Tabela I, onde a orientação é estimada quadro-a-quadro. Devido à robustez apresentada, a seguir, nos restringiremos ao caso da estimação da orientação baseada apenas no ITD.

TABELA I  
 PERFORMANCE DAS RNAs PARA ESTIMAÇÃO POR QUADROS.

Ângulo	ILD		ITD		E+ITD	
	TA	EOM	TA	EOM	TA	EOM
0°	2,1%	104,9°	99,4%	0,5°	99,2%	2,8°
45°	25,0%	67,5°	77,8%	10,2°	92,5%	7,3°
90°	46,2%	53,1°	89,0%	5,6°	81,0%	12,6°
135°	0,0%	88,4°	42,1%	47,4°	66,7%	20,5°
180°	40,1%	70,3°	2,1%	102,1°	43,1%	44,2°
225°	5,5%	102,5°	47,5%	51,9°	65,4%	32,2°
270°	41,1%	61,7°	87,5%	8,0°	87,8%	7,3°
315°	20,6%	76,4°	98,1%	0,9°	97,6%	1,5°
Média	22,6%	78,1°	67,9%	28,3°	79,0%	16,1°

Como pode ser visto na coluna ITD da Tabela I, a ambiguidade discutida na Seção I contribui para reduzir a performance no intervalo  $135^\circ \leq \theta \leq 225^\circ$ . Para resolver esta ambiguidade, um atributo adequado tem de ser extraído a partir dos dados e ser alimentado na RNA. Uma vez que é prontamente disponível, consideramos o uso das energias dos pares de quadros (E), pois espera-se que seja maior quando a fonte está virada para o arranjo ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  ou  $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ) que quando sua parte posterior está voltada para o arranjo ( $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ ). Como pode ser visto na coluna E+ITD da Tabela I, isto leva a uma considerável melhora no intervalo  $135^\circ \leq \theta \leq 225^\circ$ .

### B. Estimação por multiquadro

Em um sistema de comando de voz, todo o comando falado poderia ser usado em um procedimento de estimação multiquadro, porém sempre havendo um compromisso entre TA e o atraso para computação do resultado da estimação. Um procedimento de estimação multiquadro simples é por maioria de votos, ou seja, para um dado número de quadros assume-se que a orientação correta é aquela que obteve maior número de votos. Assumindo-se independência entre as estimativas por quadros teríamos  $TA_N$ , estimativa multiquadro, de

$$TA_N = 100 \times \sum_{k=0}^N P_k R_k, \quad (6)$$

sendo que  $P_k$  é a probabilidade de que a correta orientação é escolhida em  $k$  quadros em um total de  $N$  quadros e  $R_k$  é a probabilidade de que no restante dos  $N - k$  quadros nenhuma outra orientação é escolhida em  $k' \geq k$  quadros. Com  $p = TA/100$ ,  $P_k$  é dado por

$$P_k = \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k}, \quad (7)$$

sendo que  $R_k$  depende da distribuição dos erros de estimação. A suposição mais favorável seria considerar os erros de estimação distribuídos uniformemente entre todas as orientações incorretas. Uma suposição mais conservadora, que é comprovada pelos resultados experimentais, é que os erros são distribuídos uniformemente entre duas orientações incorretas. Neste caso,

$$R_k = \begin{cases} 0, & k < \lfloor \frac{N}{3} + 1 \rfloor \\ \sum_{m=N-2k+1}^{k-1} \binom{N-k}{m} 0, 5^{N-k}, & \lfloor \frac{N}{3} + 1 \rfloor \leq k < \lfloor \frac{N}{2} + 1 \rfloor \\ 1, & k \geq \lfloor \frac{N}{2} + 1 \rfloor \end{cases} \quad (8)$$

Escolhendo-se  $N = 70$  (que para um deslocamento de quadro de 128 amostras e frequência de amostragem de 16 kHz, correspondem a 560 ms de atraso) os valores de  $TA_N$  que resultam dos valores de TA da coluna ITD+E da Tabela I estão na coluna “ $TA_N$  – Modelo” da Tabela II. Como pode ser visto na Tabela II, “ $TA_N$  – Modelo” é próximo dos resultados experimentais para o caso multiquadro, o que mostra um grande melhora sobre o caso da estimação por quadros.

 TABELA II  
 PERFORMANCE DAS RNAs PARA ESTIMAÇÃO MULTICUADROS  
 CONSIDERANDO-SE ITD+E.

Ângulo	$TA_N$ – Modelo	Experimental
0°	100%	100%
45°	100%	100%
90°	100%	100%
135°	100%	98,9%
180°	86,3%	87,6%
225°	100%	100%
270°	100%	100%
315°	100%	100%
Média	98,3%	98,3%

## VI. CONCLUSÃO

Um modelo físico simples que consiste em uma fonte pontual deslocada do seu centro de rotação foi proposto para a análise do problema da estimação da orientação de uma fonte acústica direcional. Quando a diferença de tempo de chegada dos sinais é levada em consideração, um pequeno arranjo de apenas dois microfones mostrou-se suficientemente robusto contra fatores não levados em consideração no modelo, tais como a variação na diretividade do microfone e uma reverberação branda. Isto foi mostrado comparando-se os valores previstos e medidos dos atributos binaurais ITD e ILD, e usando-os como entradas em RNAs para estimação da orientação da fonte. A ausência de ITD em trabalhos anteriores, apesar da sua utilidade, é possivelmente devido ao fato de se considerar uma fonte pontual coincidindo com o seu centro de rotação.

Além de ITD e ILD, a energia dos pares de quadros foi usado pela RNA a fim de resolver a ambiguidade na orientação quando se usam apenas dois microfones. Utilizando estimação multiquadro, mostrou-se que uma taxa de acertos de 98% estimativa é viável para todas as orientações, exceto para 180°, caso em que o resultado é superior a 86%.



## REFERÊNCIAS

- [1] S. Hwang, Y. Park, Y. Park, "Sound direction estimation using an artificial ear for robots," *Robotics and Autonomous Systems*, 59 (3–4) (2011) 208–217.
- [2] A. Y. Nakano, S. Nakagawa, K. Yamamoto, "Distant speech recognition using a microphone array network," *IEICE Transactions on Information and Systems*, E93-D (9) (2010) 2451–2462.
- [3] A. Sasou, "Acoustic head orientation estimation applied to powered wheelchair control," in: *Second International ICST Conference on Robot Communication and Coordination*, 2009, pp. 1–6.
- [4] S. T. Shivappa, B. D. Rao, M. M. Trivedi, "Role of head pose estimation in speech acquisition from distant microphones," in: *Proceedings of ICASSP*, 2009, pp. 3557–3560.
- [5] T. Suzuki, H. Nakajima, H. Tsuru, T. Arai, K. Nakadai, "3D sound field recording and reproducing system including sound source orientation", in: *Forth International Universal Communication Symposium (IUCS)*, 2010, pp. 215–220.
- [6] J. M. Sachar, H. F. Siverman, "A baseline algorithm for estimating talker orientation using acoustical data from a large-aperture microphone array," in: *Proceedings of ICASSP*, 2004, pp. 65–68.
- [7] A. Abad, C. Segura, C. Nadeu, J. Hernando, "Audio-based approaches to head orientation estimation in a smart-room," in: *Proceedings of Interspeech*, 2007, pp. 590–593.
- [8] A. Y. Nakano, S. Nakagawa, K. Yamamoto, "Automatic estimation of position and orientation of an acoustic source by a microphone array network," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (6) (2009) 3084–3094.
- [9] A. Levi, H. Silverman, "A robust method to extract talker azimuth orientation using a large-aperture microphone array," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 18 (2) (2010) 277–285.
- [10] M. Brandstein, D. Ward, *Microphone Arrays: Signal Processing Techniques and Applications*, Springer, New York, 2001.
- [11] A. Abad, C. Segura, D. Macho, J. Hernando, C. Nadeu, "Audio person tracking in a smart-room environment," in: *Proceedings of Interspeech*, 2006, pp. 2590–2593.
- [12] D. Ampeliotis, K. Berberidis, "Low complexity multiple acoustic source localization in sensor networks based on energy measurements," *Signal Processing*, 90 (4) (2010) 1300–1312.
- [13] S. J. Searle, "Efficient matched processing for localisation of a moving acoustic source," *Signal Processing*, 85 (9) (2005) 1787–1804.
- [14] S. M. Williams, K. D. Frampton, I. Amundson, P. L. Schmidt, "Decentralized acoustic source localization in a distributed sensor network," *Applied Acoustics*, 67 (10) (2006) 996–1008.
- [15] M. Fallon, S. Godsill, "Acoustic source localization and tracking using track before detect," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 18 (6) (2010) 1228–1242.
- [16] M. Karjalainen, M. Tikander, A. Härmä, "Head-tracking and subject positioning using binaural headset microphones and common modulation anchor sources," in: *Proceedings ICASSP*, 2004, pp. 101–104.
- [17] N. Roman, D. Wang, "Binaural tracking of multiple moving sources," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16 (4) (2008) 728–739.
- [18] H. Finger, P. Ruvolo, S.-C. Liu, J. R. Movellan, "Approaches and databases for online calibration of binaural sound localization for robotic heads," in: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 4340–4345.
- [19] J. Woodruff, D. Wang, "Binaural localization of multiple sources in reverberant and noisy environments," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 20 (5) (2012) 1503–1512.
- [20] R. Parisi, F. Camoes, M. Scarpiniti, A. Uncini, "Cepstrum prefiltering for binaural source localization in reverberant environments," *IEEE Signal Processing Letters*, 19 (2) (2012) 99–102.
- [21] A. Brutti, M. Omologo, P. Svaizer, "Inference of acoustic source directivity using environment awareness," in: *Proceedings of 19th European Signal Processing Conference*, 2011, pp. 151–155.
- [22] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Macmillan, New York, 1994.
- [23] "TIMIT Acoustic-Phonetic Continuous Speech Corpus," Retrieved May 18, 2013 from <http://www.ldc.upenn.edu/Catalog/CatalogEntry.jsp?catalogId=LDC93S1>
- [24] N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurements," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 69 (5) (1981), 1484–1488.
- [25] P.M.S. Burt, "Measuring acoustic responses with maximum-length sequences," *SBT/IEEE International Telecommunication Symposium (ITS)*, 1990, pp. 284–289.