

휴대형 심전계 장치의 RR 간격의 정확도 개선을 위한 보간법 개발

이은미, 홍주현, 차은종, 이태수

충북대학교 의과대학 의공학교실

Interpolation Technique to Improve the Accuracy of RR-interval in Portable ECG Device

Eun-Mi Lee, Joo-Hyun Hong, Eun-Jong Cha, Tae-Soo Lee

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea.

(Received May 12, 2010. Accepted June 9, 2010)

Abstract

HRV(Heart rate variability) analysis parameter is widely used as an index to evaluate the autonomic nervous system and cardiac function. For reliable HRV analysis, we need to acquire the accurate ECG signals. Most of commercially available portable ECG devices have low sampling rate because of low power consumption and small size issues, which make it difficult to measure RR-interval accurately. This study is to improve the accuracy of RR-interval by developing R-wave interpolation technique, based on the morphological characteristics of the QRS complex. When the developed method was applied to ECG obtained at 200 Hz and the results were compared with 1000 Hz reference device, the error range decreased by 1.33 times in sitting and by 2.38 times in cycling exercise. Therefore, the proposed interpolation technique is thought to be useful to improve the accuracy of R-R interval in the portable ECG device with low sampling rate.

Key words : RR-interval, ECG, HRV, interpolation, QRS complex

1. 서론

통계적 자료에 의하면 지난 2008년, 우리나라에서는 21,400여 명이 심장 질환으로 사망하였고 이중 심장성 부정맥과 심부전으로 인한 사망자는 6,530여 명으로 약 30%를 차지하고 있다[1]. 이러한 심장질환에 의한 사망률을 감소시키기 위해서는 조기 진단과 신속하고 적절한 치료가 중요하며, 이를 위해 최근 국내에서도 유비쿼터스 헬스케어(u-헬스)를 위한 휴대형 심전계 장치가 개발되고 있다[2].

심장질환의 진단을 위한 심전도는 보통 500~1000 Hz의 샘플율로 획득해야지만 정확한 심전도의 모양을 파악할 수 있고, 병의 진단에 있어서 오류를 줄일 수 있다[3-5]. 하지만 u-헬스를 위한 휴대형 심전계 장치들의 경우 휴대성과 24시간 모니터링 기능을 위해 초소형 초경량, 저 전력 시스템을 지향하며, 특히 원격서버와의

응급이벤트 데이터 통신을 위해 휴대폰 네트워크 기능이 내장되기 때문에 장치의 크기, 중량, 및 전력 등을 종합적으로 고려해 볼 때, 이는 200 Hz 이하의 낮은 심전도 샘플율을 가질 수밖에 없는 실정이다[2].

낮은 샘플율은 심전도 신호의 품질을 저하시키고 이는 분석의 오류를 가져올 수밖에 없다[3]. 이러한 문제점은 이미 오래전부터 논의 되어 왔고, 이를 극복하기 위한 많은 보간법(interpolation)이 개발되었다. 적절한 보간법이 적용된다면 낮은 샘플율을 지닌 심전도라 할지라도 HRV(Heart rate variability) 분석에 사용될 수 있다[3,6,7].

Castinlioni 등[6]이 발표한 논문은 주파수 영역에서 Zero-padding 방법으로 보간법을 수행한 후에 개선된 해상도에서의 R-peak의 위치를 구하는 것으로서, 본 논문의 기법과는 차이가 있으며 시간영역에서 처리하는 정확도가 상대적으로 떨어질 뿐만 아니라 계산량도 많다.

본 논문에서는 200 Hz의 샘플율을 지닌 휴대형 심전계 장치에서 획득된 ECG를 이용해 RR 간격을 얻는데 있어서 생기는 오차의 문제를 극복할 수 있는 새로운 보간법을 제안하고자 한다. 그럼

Corresponding Author : 이태수
(361-763) 충북 청주시 흥덕구 성정로 410
충북대학교 의과대학 의공학교실
Tel : +82-43-269-6332 / Fax : +82-43-272-6332
E-mail : tslee@chungbuk.ac.kr
본 연구는 보건복지부 보건의료기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임.
(과제고유번호: A040032)

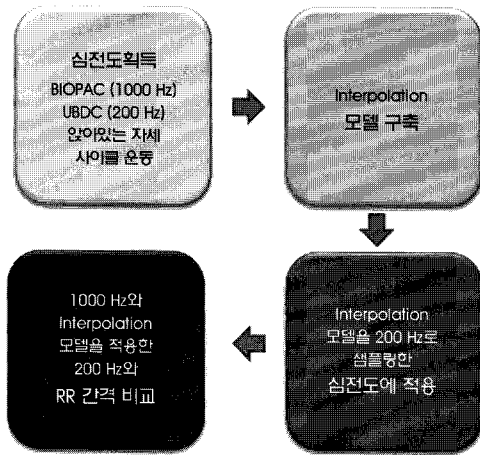


그림 1. 실험 구성도
Fig. 1. Experiment Process Diagram

1에는 본 연구의 전체 구성도가 나타나 있다. 연구는 크게 보간법 개발 단계와 보간법 적용 단계로 나누어진다.

첫 번째 단계, 200 Hz와 1000 Hz에서 얻은 ECG를 비교하고, R 파 고유의 형태학적 특성을 이용하여 200 Hz로 샘플링한 ECG의 RR 간격의 정확도를 개선할 수 있는 R파 보간법을 개발한다.

두 번째 단계, 개발된 R파 보간법을 실험실 환경에서 측정된 ECG에 적용하여 RR 간격의 정확도가 개선되었는지 확인한다.

II. 재료 및 방법

A. 심전도 신호 획득

실험에 사용될 심전도 획득 장치는 기준장치로 사용한 상용의 BIOPAC(BIOPAC Systems, Inc.)과 실험실에서 개발한 휴대형 ECG 모니터링 장치인 UBDC 모니터링 장치이며, 그림 2에 나타내었다.

실험에 들어가기 전 피실험자는 가슴과 복부에 7개의 전극을 동시에 부착한다(그림 2). 이들 중 3개(가슴 2, 복부 1)는 BIOPAC의 ECG 100C와 연결하여 1000Hz의 샘플율로 심전도를 획득하고, 나머지 4개(가슴 2, 복부 2)의 전극은 UBDC 모니터링 장치와 연결하여 200Hz로 심전도를 획득한다.

실험의 준비가 끝나면 피실험자는 침대에 누워 15분간 휴식을

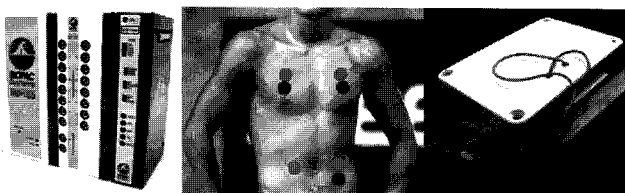


그림 2. 심전도 획득을 위한 장치들
Fig. 2. Device for ECG Signal Acquisition

표 1. 실험 프로토콜

Table 1. Protocol for the experiment

실험 내용	소요시간
Rest/ 휴식	15분
Sitting/ 앉기	6분
Rest/ 휴식	5분
Cycling/ 사이클 운동(40 bpm)	6분
총 소요 시간	32분

취해 심박수를 안정시킨다. 그 다음 의자에 바른 자세로 앉아있는 상태로 6분간 ECG를 획득하고, 5분의 휴식을 가진 후 낮은 강도의 사이클 운동을 하게하여 또 다시 6분간의 ECG를 획득한다(표 1).

B. R파 보간법 개발

각각 1000 Hz와 200 Hz에서 동시에 획득한 ECG 중, 임의의 연속된 10개의 R-파를 선별하였다. 200 Hz에서의 ECG는 1000 Hz와 비교하여 부드럽지 못한 모양을 가지고 있고, R-peak의 위치에서 차이를 보였다.

200Hz의 ECG에서 10개의 R-peak를 찾고, 각 R-peak를 중심으로 상승구간과 하강구간으로 구분하였다. 그림 3을 살펴보면 상승구간은 하강구간에 비해 가파른 기울기를 보이고 적은 수의 값을 가지고 있고, 하강구간은 좀 더 완만하며 더 많은 수의 값을 가짐을 알 수 있다. 이렇게 상승과 하강구간으로 나눈 후 회귀분석(regression analysis)을 통해 각 구간의 회귀선의 방정식을 구한다.

$$y = ax + b$$

a = 회귀선의 기울기(회귀계수), b = 회귀선의 절편

이제 상승과 하강구간의 회귀선이 만나는 접점의 시간 좌표를 구해 보정된 R-peak의 좌표값을 얻을 수 있다. 상승과 하강구간의 접점(x')을 구하는 방정식은 다음과 같다.

$$\text{상승구간} : y = a_1 x + b_1$$

$$\text{하강구간} : y = a_2 x + b_2$$

$$\text{접점 } (x') = (b_2 - b_1) / (a_1 - a_2)$$

접점(x')의 위치는 상승구간과 하강구간에 몇 개의 값을 포함시키느냐에 따라 달라진다. 각 구간의 최적의 값의 개수는 여러 가지 경우를 시험해본 결과 200 Hz의 샘플율에서 상승구간 4개, 하강구간은 R-peak를 포함한 5개의 값으로 구성했을 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

C. R파 보간법 적용

앉아 있는 경우와 사이클 운동을 하는 경우에 200 Hz 샘플율로

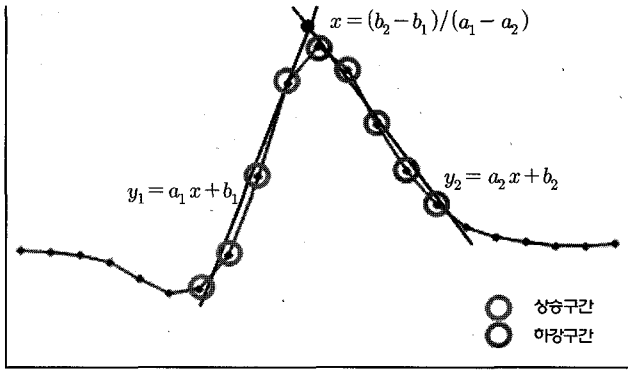


그림 3. QRS 구간의 형태적 특성을 이용한 R파 보간법의 원리
 Fig. 3. Principle of R-wave interpolation technique based on shape of QRS complex

획득한 6분의 ECG는 전후 30초씩을 잘라내고, 5분의 data만을 사용한다. 각 5분의 data에 개발된 R파 보간법을 적용하여 새로운 R-peak를 구하고, RR 간격을 계산한다. 모든 과정은 마이크로소프트 오피스 엑셀을 사용하여 처리되었다.

D. 통계

BIOPAC에서 1000 Hz로 획득한 ECG의 RR 간격과 200 Hz로 획득한 ECG 데이터에 새로운 보간법을 적용시키기 전과 후의 RR 간격의 차이의 Mean(평균)과 SD(표준편차)를 비교하고, Bland-Altman Plot을 통해 그 차이를 분석한다[8].

III. 결과

피실험자의 평균 심박수는 앉아 있는 경우 65.8 bpm, 사이클 운동을 하는 경우 103.2 bpm이었으며, 평균 RR 간격은 각각 912.9 ms, 582.2 ms였다. 각 5분간의 R-peak의 개수는 앉아있는 경우 329개, 사이클 운동을 하는 경우 516개였다(표 2).

표 3은 200 Hz의 심전도에 R파 보간법 모델을 적용하여 얻은 RR 간격과 200 Hz의 원심전도에서 계산된 RR 간격을 1000 Hz에서 얻은 심전도의 RR 간격과 오차를 비교한 결과를 보여주고 있다. 오차의 평균(mean)은 변화가 없으나 R파 보간법 모델을 적용한 경우, 오차의 표준편차(SD)가 줄어든 것을 알 수 있다. 200 Hz 원심전도와 1000 Hz의 원심전도에서 계산한 RR 간격의 오차의

표 2. 피실험자의 심전도 데이터

Table 2. ECG data of the subject

	Sitting	Cycling
Mean of HR	65.8 bpm	103.2 bpm
Mean of RR interval	912.9 ms	582.2 ms
Numbers of R-peak	329	516

표 3. 200 Hz와 1000 Hz, 보간법을 적용한 200 Hz와 1000 Hz ECG RR 간격의 차이 비교

Table 3. Comparison of difference between 200 Hz and 1000 Hz ECG RR-interval and that between interpolated 200 Hz and 1000 Hz

	Sitting		Cycling	
	200 Hz vs 1000 Hz	IP200 Hz vs 1000 Hz	200 Hz vs 1000 Hz	IP200 Hz vs 1000 Hz
Mean(ms)	0.2	0.2	0.12	0.12
SD(ms)	3.06	2.3	2.24	0.94

표준 편차는 앉아있는 경우에는 3.06 msec, 사이클 운동을 하는 경우에는 2.24 msec였고, 200 Hz에 R파 보간법 모델을 적용하여 계산한 RR 간격과 1000 Hz 심전도의 RR 간격의 오차의 표준편차는 앉아있는 경우에는 2.3 msec, 사이클 운동을 하는 경우에는 0.94 msec였다.

그림 4와 5는 실험결과로 얻은 RR 간격의 평균과 차이 값을 이용하여 그려진 Bland-Altman Plot이다. 그림 4는 앉아있는 경우를 그림 5는 사이클 운동을 하는 경우이며, 두 그림 모두 R파 보간

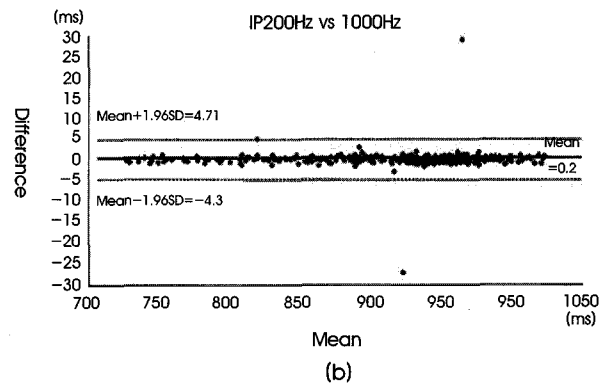
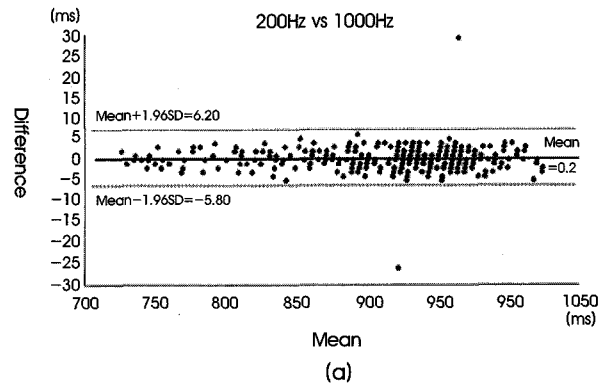


그림 4. 200 Hz와 1000 Hz, 보간법을 적용한 200 Hz와 1000 Hz ECG RR 간격의 차이 비교[앉아있는 경우]: Bland-Altman Plot

Fig. 4. Comparison of difference between 200 Hz and 1000 Hz ECG RR-interval and that between interpolated 200 Hz and 1000 Hz [in sitting]: Bland-Altman Plot

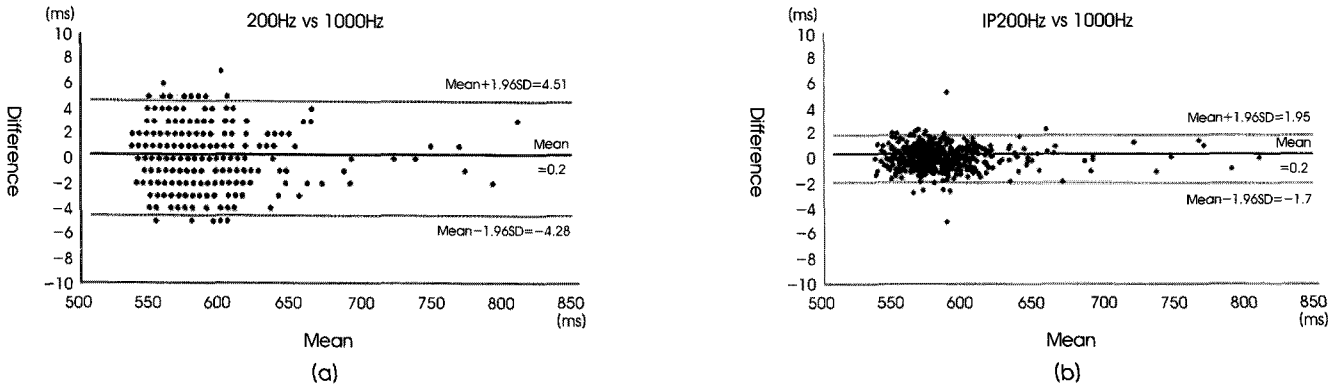


그림 5. 200 Hz와 1000 Hz, 보간법을 적용한 200 Hz와 1000 Hz ECG RR 간격의 차이 비교[사이클 운동을 하는 경우]: Bland-Altman Plot
 Fig. 5. Comparison of difference between 200 Hz and 1000 Hz ECG RR-interval and that between interpolated 200 Hz and 1000 Hz [in cycle exercise]: Bland-Altman Plot

법을 적용한 경우에 오차가 줄어든다는 것을 보여준다.

그림 4는 앉아 있는 경우의 RR 간격을 비교한 Bland-Altman Plot으로서 그림 4-a는 200 Hz 원심전도의 RR 간격과 1000 Hz 원심전도의 RR 간격사이의 오차 범위를, 그림 4-b는 200 Hz의 심전도에 R파 보간법을 적용하여 계산한 RR 간격과 1000 Hz 원심전도의 RR 간격 사이의 오차 범위를 보여준다. R파 보간법을 적용한 경우 데이터들의 분포가 적용하지 않은 경우보다 조밀하게 평균값(mean)을 향해 모여 있음을 확인할 수 있다. 오차 허용 범위는 R파 보간법을 적용하지 않은 경우는 -5.80~6.20 msec였고, 보간법을 적용한 경우에는 오차 허용 범위가 -4.3~4.71 msec로 좁아졌음을 알 수 있다.

그림 5는 사이클 머신으로 운동을 하는 경우의 RR 간격의 오차 범위를 보여준다. 이 경우도 앉아 있는 경우와 마찬가지로 보간법을 적용한 그래프가 데이터 포인트들이 평균값을 향해 더 조밀하게 모여 있는 것을 볼 수 있다. 보간법을 적용하지 않은 경우의 오차 허용범위는 -4.28~4.51 msec, 적용한 경우에는 -1.70~1.95 msec 였다.

IV. 고찰 및 결론

본 논문에서는 200 Hz의 낮은 샘플율을 지닌 휴대형 심전계 장치에서 얻은 RR 간격의 정확성을 개선하기 위한 R파 보간법을 제안하였다. 정확한 RR 간격은 심혈관 질환을 진단하는데 중요한 자료로 사용되고 있고 보통 높은 샘플율로 획득되어야만 임상진단의 자료로 사용될 수 있다[9]. 하지만 적당한 보간 기술만 사용한다면 낮은 샘플율에서도 비교적 정확하고 임상 진단의 참고 자료가 될 수 있는 RR 간격을 얻을 수 있다.

여기서 제시한 R파 보간법은 QRS파의 형태적 특징에 기초하여 데이터 포인트들의 분포 상태를 상승구간과 하강 구간으로 나누고 후 각 구간을 회귀분석 하여 구한 두 회귀선의 접점을 계산함으로써 새롭게 보정된 R-peak를 찾아내는 매우 간단하면서도 효율성

높은 방법이다.

비록 여기서 제시한 R파 보간법이 낮은 샘플율로 얻어낸 심전도에서 RR 간격의 정확성을 개선시킨 하였지만 다음과 같은 몇 가지 제한점이 남아 있다. R파의 형태가 다양했음에도 불구하고 기법의 단순함을 위해 오직 한 가지 방법으로 상승구간(4개의 데이터 포인트)과 하강구간(R-peak를 포함한 5개의 데이터 포인트)을 나누어 회귀분석을 시행하였다. 이와 같이 상승구간과 하강구간을 분류하면 대부분의 R-peak에서 오차를 줄여주지만, 200 Hz R파의 모양이 사다리꼴 모양이며 R-peak가 사다리꼴의 왼쪽으로 치우친 경우 R-peak의 정확도가 오히려 더 떨어졌다. 이러한 문제의 결과는 Bland-Altman Plot에서 확실히 나타나며, 보간법을 적용하여 RR 간격의 정확도가 개선되었음에도 불구하고 그림 5-b에서 오차허용범위를 벗어난 몇 개의 점들을 볼 수 있다. 단, 그림 4-b에서 오차 범위를 벗어난 점들은 심전도 획득 장치의 오류로 판단된다. 만약 R파의 모양별로 분류하고 각 모양에 따라 각각 다른 방식으로 구간을 나누다면 보다 정확한 RR 간격을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

RR 간격의 측정은 이와 관련된 다른 지표들에 영향력이 크므로 매우 중요하다. 정확한 RR 간격의 획득은 HRV 분석뿐만 아니라, 정확한 R-peak의 위치로부터 유추해 낼 수 있는 PTT(pulse transit time) 등에 중요한 기초자료가 된다[10]. HRV나 PTT의 분석은 보통 500~1000 Hz 이상의 높은 샘플율을 요구한다. 그렇기 때문에 낮은 샘플율을 지닌 휴대형 심전계 장치에서는 심도 있는 HRV나 PTT의 분석이 어렵다. 하지만 본 연구에서 제안한 방법을 적용한다면 200 Hz의 낮은 샘플율에서도 오차가 적은 RR 간격을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

앞으로의 연구에서는 본 논문에서 제안한 보간법을 R파의 모양별로 세분하여 RR 간격의 정확도를 더욱 올릴 수 있도록 개선하고 본 기법을 적용하여 얻어진 RR 간격이 HRV와 PTT를 분석하는데 얼마나 신뢰성을 가질 수 있는가를 실험할 것이다.

참고문헌

- [1] Statistics Korea, "Number of death(1983~) according to the causes of death(236 items)/gender/age(5 years), Death rate(2000~)," Available at <http://www.kostat.go.kr>, Accessed Feb 19, 2010.
- [2] T.S. Lee, and J.H. Hong, "Current Developments of Biomedical Mobile Devices for Ubiquitous Healthcare," *J. of Biomed. Eng. Res.*, vol. 30, no. 3, pp.185-190, 2009.
- [3] Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology, "Heart rate variability - Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use," *European Heart Journal*, vol. 17, no. 3, pp.354-381, 1996.
- [4] M. Merri, D.C. Farden, J.G. Mottley, and E.L. Titlebaum, "Sampling frequency of the electrocardiogram for spectral analysis of the heart rate variability," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 37, no. 1, pp.99-106, 1990.
- [5] F. Badilini, A.J. Moss, and E.L. Titlebaum, "Cubic Spline Baseline Estimation in Ambulatory ECG Recordings for the Measurement of ST Segment Displacements," in *Proc. the 13th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Orlando, FL, USA, Oct. 1991, pp.584-585.
- [6] P. Castiglioni, L. Piccini, and M.Di. Milan, "Interpolation Technique for Extracting Features from ECG Signals Sampled at Low Sampling Rates," *Computers in Cardiology*, vol. 30, pp.481-484, 2003.
- [7] G.M. Frieson, T.C. Jannett, M.A. Jadallah, S.L. Yates, S.R. Quint, and H.T. Nagle, "A Comparison of the Noise Sensitivity of Nine QRS Detection Algorithms," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 37, no. 1, pp.85-98, 1990.
- [8] K. Dewitte, C. Fierens, D. Stockl, and L.M. Thienpont, "Application of the Bland - Altman Plot for Interpretation of Method-Comparison Studies: A Critical Investigation of Its Practice," *Clinical Chemistry*, vol. 48, no. 1, pp.799-801, 2002.
- [9] G. Nollo, L. Faes, B. Pellegrini, A. Porta, and R. Antolini, "Synchronization Index for Quantifying Nonlinear Causal Coupling between RR Interval and Systolic Arterial Pressure after Myocardial Infarction," *Computers in Cardiology*, vol. 27, pp.143-146, 2000.
- [10] J. Allen, "Photoplethysmography and Its Application in Clinical Physiological Measurement," *Physiological Measurement*, vol. 28, no. 3, pp. R1-R39, 2007.