

레이저 산란 현상을 이용한 피부혈류 화상화 시스템의 개발

이민철, 藤居仁

일본 큐슈공업대학 정보공학부 전자정보공학과

Development of Laser Speckle Flowgraphy System for Monitoring Blood Flow in Skin Tissue

M.C. Lee, H. Fujii

Department of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology
(Received November 9, 2006. Accepted March 7, 2007)

Abstract

In this paper, we develop a new system to visualize the blood flow map in skin tissue, using the technique of Laser Speckle Flowgraphy (LSFG). The measuring unit consists of the laser diode, imaging system, line sensor, scanning mirror, and one-board microcomputer. The speckle signal is analyzed and sent to a PC, where the blood flow in a tissue area of 14mm × 26 mm is evaluated and displayed in a 2-D color map. It is demonstrated that the new LSFG instrument is useful to evaluate the degree of allergic reaction in patch test.

Key words : laser speckle, blood flow analysis, medical imaging, patch test

1. 서 론

혈액은 생명유지에 필요한 산소와 영양을 체내의 세포에 보내져서 노폐물과 체내에 불필요한 것을 회수하는 등 생명유지에 없어서는 안 될 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 과정은 의학상 중요한 정보로 여겨지고 있다. 피부내부에는 무수한 모세혈관이 존재하고, 모세혈관의 수축 이완 작용을 통해 체온조절 역할을 담당하기도 한다. 혈색에도 피부 혈류의 상태가 반영되어 피부는 건강상태를 나타내는 하나의 지표가 된다. 이러한 이유에서 피부 혈류측정의 연구가 무수히 진행되고 있다.

현재 피부 혈류 측정계로 실용화 되어있는 대표적인 제품은 레이저 도플러 혈류계 (Laser Doppler Flowmeter, 이하 LDF)를 들 수 있다[1,2]. LDF는 광 파이버 등을 이용해서 한점의 혈류를 모니터링하는 용도로 사용되어 왔지만, 최근에는 레이저 spot을 조사해서 2차원 map으로 평가하는 제품도 시판되고 있다. 본 연구팀은 처음부터 넓은 면적을 레이저로 조사해서 그 spot전체를 이미지 센서상에 결상해서, 혈류의 2차원 map을 화상화하는 방법을 제안하고, 레이저 스펙클 혈류 화상화법 (Laser Speckle

FlowGraphy : 이하LSFG)으로서 개발을 하고 있다. LDF가 신호의 주파수 해석을 기반으로 하고 있는 반면, LSFG는 산란광이 서로 간섭해서 발생하는 레이저 스펙클의 시간변화를 해석하는 것이 차이점이라 할 수 있다. 전자는 후자에 비해 산란광을 1개의 수광기로 검출하고 어느 정도의 면적을 측정하는 데는 수분 단위의 시간이 걸리기 때문에 시간 응답성에 한계가 있는 단점이 있다. 하지만 LSFG는 이미지 센서와 같은 다수의 수광소자를 두기 때문에 측정시간이 수초 단위에 혈류변동을 2차원 map으로 표시할 수 있는 것이 최대의 장점이라고 할 수 있다. 현재 LSFG시스템은 수광소자로 CCD카메라를 이용한 망막(retina)[3-5], 대퇴골두(femoral head)[6]의 혈류 화상화 시스템과, 수광소자로 라인센서를 이용한 둔부(hip skin)[7,8], 피부[9,10]의 혈류 화상화 시스템이 개발되어 있다. 기존의 피부 등의 혈류 화상화 시스템은 광범위의 혈류측정 시스템으로 측정기기가 크고 이동이 불편하며 해상도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 알레르기의 원인물질을 판별할 수 있는 패치테스트(Patch Test)용 혈류 화상화 시스템을 개발하여 실험을 통한 시스템의 유효성을 확인하였다. 이 시스템은 측정기기가 접촉성으로 측정이 간편하고 빠른 시간에 측정이 가능하다. 패치테스트는 피험자의 피부 표면에 알레르기의 원인이라고 생각되는 물질을 부착한 후 알레르기 반응의 유무를 조사하여 원인물질을 판별하는 방법이다. 알레르기 반응은 일반적으로 강한 가려움증과 홍반, 발진으로서 나타나지만, 현재의 패치테스트의 진단은 눈으로 판별을

Corresponding Author : 이민철

Department of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Iizuka, Fukuoka 820-8502, Japan
Tel : +81-948-29-7699 / Fax : +81-948-29-7651
E-mail : lee@cse.kyutech.ac.jp

하고 있어 객관적으로 평가하기 어렵다. 본 피부 혈류 시스템을 통해 혈류값에 의한 평가가 가능해진다면 보다 정확한 진단이 가능해 질것이라 생각된다.

II. LSFSG시스템

A. LSFSG시스템의 원리

LSFG시스템의 원리는 그림1과 같다. 생체에 레이저를 조사하면 혈액에 포함되어있는 혈구 등이 산란입자가 되어 레이저가 산란된다. 산란입자는 랜덤하게 분포하고 있기 때문에 산란광이 서로 간섭하여 결상면에는 스펙클(speckle)이라 불리는 랜덤한 반점 모양이 형성된다. 이 스펙클의 변동 속도는 산란입자의 이동속도에 의해 비례하고 혈류속도가 저하하면 스펙클의 변동도 느려진다. 결상면에 이미지 센서(Image Sensor)로 스펙클의 변화를 수광해서 각화소의 시간변화율을 구함으로써 혈류 측정이 가능해진다. 더욱이 측정데이터를 PC에서 통계 처리해서 혈류분포를 2차원 컬러map으로 표시한 것이 LSFSG시스템이다.

B. 혈류평가량

LSFG에는 AD(Average Derivative) 값[3,7,8,9], SBR(Square Blur Rate) 값[4,5,6] 등 다수의 혈류 평가량이 존재하고 있으며, 측정부위와 측정 방법에 따라 나뉘서 사용되고 있다. AD값은 비교적 혈류가 느린 부위의 측정에, SBR값은 비교적 혈류가 빠른 부위의 측정에 이용된다.

산란체가 이동하면 이에 대응해 스펙클도 변화한다. 라인센서의 n번째 주사할 때의 스펙클 강도와 n+1 번째의 주사할 때의 스펙클 강도의 차가 크면 클수록 이동속도는 빨라지고, 역으로 작아지면 이동속도는 느려진다. 라인센서로부터 얻어진 각 화소의 광강도차를 적산해서 평균강도로 나눈 값을 AD값이라 한다. 라인센서에서 동일 부위를 N번 주사했을 때의 화소 k에 있어서의 AD값은 아래 식과 같다.

$$AD_k = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} |I_k(t_{n+1}) - I_k(t_n)|}{(N-1)\langle I_k \rangle} \tag{1}$$

$$\langle I_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_k(t_n)$$

여기서 $\langle I_k \rangle$ 는 화소k에 있어서의 평균강도이다.

AD값은 분자에 광강도차의 적산을 표시하기 때문에 산란체의 이동속도에 비례한 값으로 동적 스펙클의 시간 변화율을 표시하고 있다. 또한 광강도차는 레이저 강도에 의존하기 때문에 평균강도 $\langle I_k \rangle$ 로 나누어 정규화한 것으로 표시하고 있다.

피부혈류를 다루는 본 논문에서는 혈류 평가량으로서 AD값을 이용했다.

C. 시스템 구성

본 시스템은 H8S 마이크로컴퓨터(H8S/2377:HITACHI)를 탑재한 측정장치, 제어장치, 측정·해석소프트웨어를 인스톨한 PC로 구성되어있다. 그림2와 같이 측정장치 내부는 레이저 및 렌즈, 미러 등으로 구성되어있다. 반도체 레이저(파장780nm, 출력20mW)에서 주사된 광은 원주 렌즈(Cylindrical lens)를 통해 피부면에 라인 spot을 형성한다. 피부로부터의 반사 산란광은 렌즈를 통해서 라인 spot을 라인센서(TCD1209: TOSHIBA) 상에 결상해서 스펙클을 검출한다. 스텝핑 모터(Stepping Motor)를 이용해 미러를 회전시켜 라인spot을 이동시켜 측정을 반복함으로써 2차원 스캔이 가능하게 된다. 취득한 데이터를 H8S 마이크로컴퓨터에서 각 라인의 광강도와 동적 스펙클의 시간 변화율을 계산한 후, 제어장치를 경유해서 PC에 USB통신으로 전송한다. PC에서는 광강도와 동적 스펙클의 시간 변화율로 혈류평가량 AD값을 그한 후, 모니터에 혈류 map을 표시한다.

본 시스템의 신호처리계는 그림3과 같다. 라인센서에 입력된 광

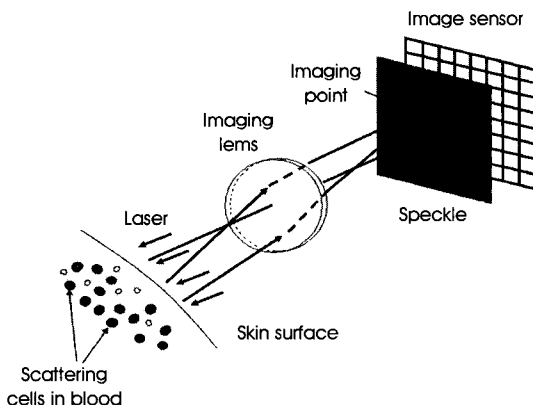


그림 1. LSFSG 시스템의 원리
Fig. 1. Principle of LSFSG system

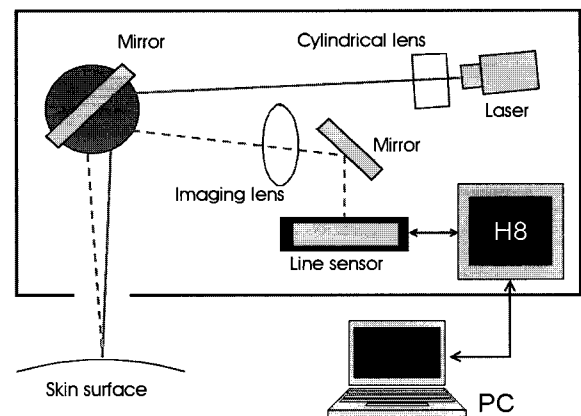


그림 2. 시스템 구성도
Fig. 2. Configuration of LSFSG system

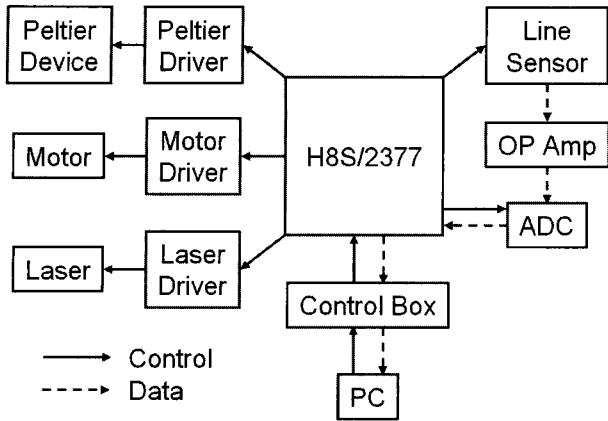


그림 3. 시스템 신호처리계
Fig. 3. Block diagram of the measurement unit

강도 신호를 OP앰프에 의해 증폭시켜 ADC(A/D Converter)에서 디지털화하고 H8S 마이크로컴퓨터의 RAM에서 각 라인의 광강도와 동적 스펙클의 시간 변화율을 계산한다. 1step의 데이터를 제어 장치를 통해 PC에 전송한다. 이런 과정을 반복해서 1장의 혈류 map을 얻는다. 본 시스템은 측정면적은 H14×W26mm이고 H55×W256 화소의 분해능을 가지고 있다. 측정시간은 약 4초이다.

H8S마이크로컴퓨터에서는 데이터의 취득·연산 이외에 라인 센서의 구동, ADC의 변환 클럭의 생성, 레이저의 구동과 출력 제어, 레이저 장치의 온도 제어, 모터의 구동 등을 행한다. 측정장치는 패치테스트를 한 부위를 측정하기 쉽게 하기 위해 가볍게 피부에 접촉해서 사용할 수 있게 설계를 했다. 패치테스터는 직경 9mm의 원형 패치(patch)에 약품 등을 발라서 피부에 부착하게 되어 있다. 알레르기 반응이 일어나는 패치의 크기 9mm와 알레르기 반응이 일어나지 않는 피부의 면적을 고려해서 측정범위를 H14×W26mm 로 설정했다.

D. 측정·평가 소프트웨어

본 시스템의 소프트웨어는 그림 4와 같이 윈도우 상에서 혈류 측정 후 혈류값 변동에 대한 평가까지 할 수 있게 되어 있다. 혈류map을 표시해서 Rubber Band로 설정한 범위내의 평균혈류값과 범위의 평균혈류값을 지정해서 혈류가 몇% 상승했는지를 표시하는 것이 가능하다. 혈류map은 컬러화하여 혈류가 빠를수록 붉은색으로 표시되며, 혈류가 느릴수록 파란색으로 표시된다.

본 시스템의 소프트웨어의 주요 기능은 이하와 같다.

- 마이크로컴퓨터와의 통신과 데이터 취득
- 데이터의 보존
- 피험자 정보의 보존
- 혈류연산처리
- 혈류map, 광강도 map의 표시
- 혈류상승 부분의 면적산출

III. 혈류측정 실험

시스템이 피부 혈류측정에 유효한지를 확인하기 위해 피부 혈류 실험을 하였다. 패치에 피검물질을 일정량 떨어뜨린 후, 피검자의 팔 내측부분에 패치를 부착해서 일정시간 후에 패치를 떼어 측정을 하였다. 실험장치는 그림 5와 같다.

A. 혈류촉진제를 이용한 실험

먼저 혈류촉진제 0.02ml를 패치에 침부해서 30분간 부착한 후 혈류측정 실험을 하였다. 혈류촉진제의 주성분인 염화칼슘은 혈관을 확장해서 혈행을 촉진하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 혈류 촉진제로 실험한 피부의 사진은 그림 6(a)와 같고 피검부위는 원형모양의 홍반을 관찰할 수 있다. 측정 소프트웨어를 이용해 측정한 혈류map은 그림 6(b)와 같다. 패치에 접촉한 부분을 중심으로 혈류값이 주변에 비교해서 77%증가한 것을 확인할 수 있다.

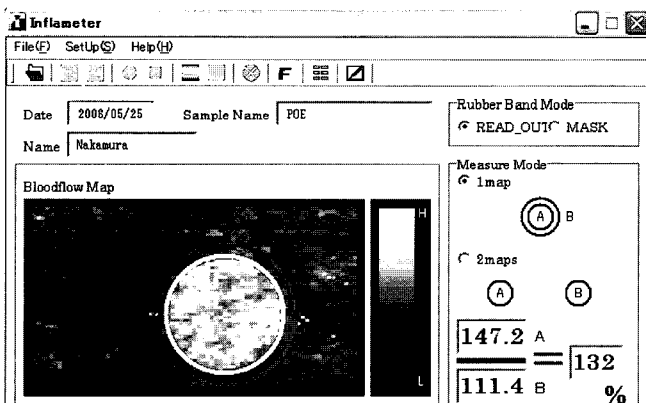


그림 4. 시스템의 소프트웨어
Fig. 4. GUI of LSFSG

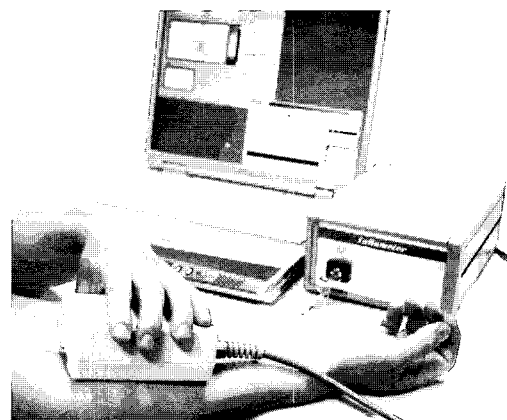
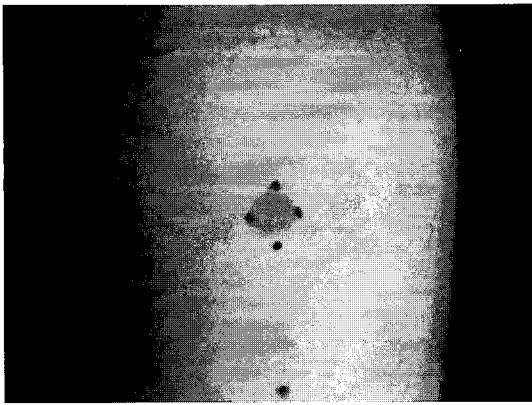
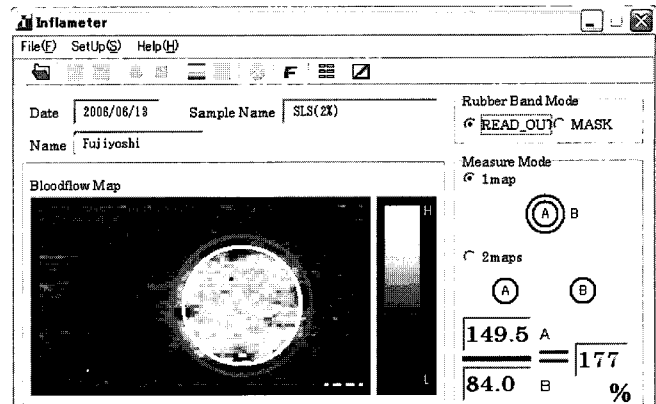


그림 5. 실험 장치
Fig. 5. LSFSG instrument



(a)



(b)

그림 6. 혈류촉진제로 실험한 측정결과 (a)피부 사진 (b) 혈류 map

Fig. 6. Promotion of the blood circulation (a) skin image under patch test (b) its blood flow map

B. 표면활성제를 이용한 실험

이번 실험은 표면활성제인 Poly-Oxy-Ethylene (POE) 5%수용액 0.02ml를 60분간 패치에 부착한 후 혈류변화를 조사하였다. 그림7은 POE를 60분간 팔에 부착 후 떼어내었을 때의 혈류map으로 이중 원의 내측의 혈류가 그 외 부분의 혈류와 비교해서 55% 상승한 것을 알 수 있었다. 이 장치는 혈류상승이 발생하는 부위를 조사하고 그 총면적을 계산하는 기능도 가지고 있기 때문에 염증의 크기도 조사할 수 있다. 그리고 본 실험에 의해 의학 분야에서 표준이 되어온 redness의 농도라고 하는 평가척도와 혈류 측정값과의 관계에는 상관관계가 없는 경우도 있는 것을 알 수 있었다. 그림8은 POE 수용액을 30분 간 패치에 부착한 후의 혈류와 이때 생긴 홍반의 redness의 변화를 조사해서 plot한 것이다. Redness는 디지털 카메라로 촬영해서 색을 분석하는 소프트웨어를 이용하여 평가한 상대량이다. 이 결과로부터 명확히 알 수 있듯이 패치를 부착한 후30분이 경과했을 때의 redness는 시간이 경과해도 거의 변화

가 없는 반면에, 혈류값은 일단 상승한 후에 서서히 저하하고 있는 것을 알 수 있다. 육안으로는 붉게 보이지만 혈류는 redness와 티레하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론 및 고찰

본 논문에서는 레이저 산란 현상을 이용해서 14mm×26mm의 피부 혈류를 2차원 혈류 map으로 관찰할 수 있는 시스템을 개발하였고 그 효율성을 검증하였다. 또한 본 시스템의 원리를 응용하여 광범위의 피부를 수초에 2차원 map으로 측정하여 여러 자극을 주었을 때의 피부 혈류분포와 혈류의 경시변화를 관찰할 수 있게 되었다. 앞으로 많은 실험을 통해 혈류측정 시스템과 LDF와의 비교 검토의 필요성이 있고, 여러 가지 자극에 의한 피부혈류 변화와 피부병 환자 등의 피부 실험을 통한 데이터 수집, 해석을 통해 여러 의료분야에서 유용하게 이용될 수 있기를 기대한다.

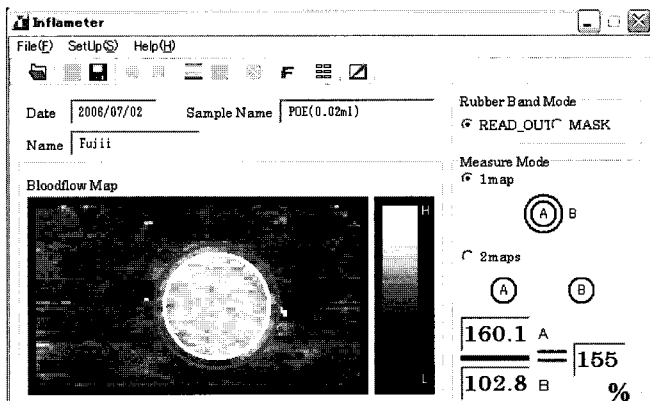


그림 7. POE로 측정된 피부 혈류 map
Fig. 7. Blood flow map increase by POE

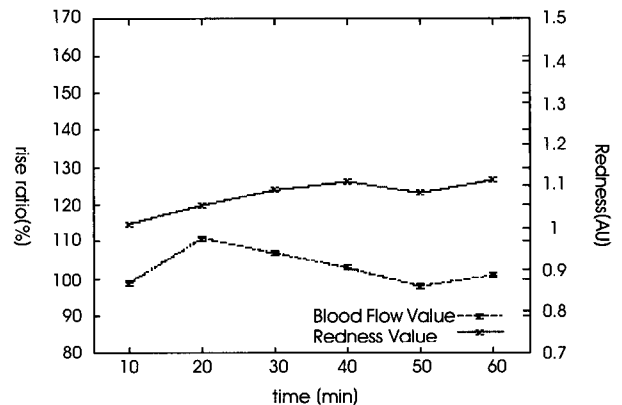


그림 8. 패치테스터에 의한 혈류 경시 변화
Fig. 8. Time variation of blood flow under patch test

참고문헌

- [1] Y. Ikeda, M.Niimi, T. Shatari, M. Hiroshi, H. Yuuji, T. Hiroshi, K. Susumu, "Comparative studies of esophageal reconstruction between Albert-Lembert astroplasty and layer to layer gastroplasty by laser-doppler flowmetry," *Jpn.J. Gastroenterol Surg.*, vol.33, pp.137-141, 2000.
- [2] J. Ueda, E.Ohya, K. Udagawa, A. Hara, M. Fukui, H. Yamagishi, T. Nakazawa, T. Yasuda, K. Ohasawa, "Effect of kampo medicines on the peripheral blood flow rate ofbetamethason-Induced oketsu syndrome mice by laser doppler flow meter," *Yakugaku Zasshi*, vol.124, no.6, pp.365-369, 2004.
- [3] H. Fujii, "Visualization of retinal blood flow by laser speckle flowgraphy," *Med. & Biol. & Comput.*, no.32, pp.302-304, 1994.
- [4] N. Konishi, H. Fujii, "Real-time visualization of retinal microcirculation by laser flowgraphy," *Opt. Eng.*, vol.34, no.3, pp.753-757, 1995.
- [5] N. Konishi, Y. Tokimoto, K. Koura, H. Fujii, "New laser speckle flowgraphy system using CCD camera," *Opt. Rev.*, vol.9, no.4, pp.163-169, 2002.
- [6] T. Hirao, S. Yamamoto, N. Konishi, H. Fujii, "Development of laser speckle flowGraphy system for monitoring blood flow in Scalp," *Jpn. J. Opt.*, vol.32, no.10, pp.623-628, 2003.
- [7] M.C. Lee, N. Konishi, H. Fujii, "Blood flow analyses of skin tissue under the sacrum using laser speckle flowgraphy," *Opt. Rev.*, vol.10, no.6, pp.562-566, 2003.
- [8] M.C. Lee, N. Konishi, H. Fujii, "An LSFSG system for monitoring blood flow in sacral skin tissue(II)," *Jpn. J. PU.*, vol.7, no.4, pp.811-817, 2005.
- [9] H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, T. Ohura, "Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing," *App. Opt.*, vol.26, no.24, pp.5321-5325, 1987.
- [10] H. Fujii, N. Konishi, M.C. Lee, "Blood flow analyses using laser speckle flowgraphy," in *ICO-ODF 04*, Chiba, Japan, Jul.2004, pp.287-288.