

피아노 연주 로봇의 개발

Development of Piano Playing Robot

박광현*, 정성훈**, Christopher Pelczar***, Thai V. Hoang****, 변증남*****

Kwang-Hyun Park*, Seong-Hoon Jung**, Christopher Pelczar***, Thai V. Hoang****, Zeungnam Bien*****

Abstract - This paper presents a beat gesture recognition method to synchronize the tempo of a robot playing a piano with the desired tempo of the user. To detect an unstructured beat gesture expressed by any part of a body, we apply an optical flow method, and obtain the trajectories of the center of gravity and normalized central moments of moving objects in images. The period of a beat gesture is estimated from the results of the fast Fourier transform. In addition, we also apply a motion control method by which robotic fingers are trained to follow a set of trajectories. Since the ability to track the trajectories influences the sound a piano generates, we adopt an iterative learning control method to reduce the tracking error.

Key Words : 감성 상호작용, 피아노 연주 로봇, 비트 제스처, 동작 제어, 반복 학습 제어

1. 서론

노인 인구가 급격하게 증가함에 따라 노인을 보살펴 주고 독립적인 생활을 보장해 줄 수 있는 서비스 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 일상생활에서 단순하고 반복적인 작업은 자동화된 가전기기의 출현으로 인간을 대신하게 되었고, 기술이 발전함에 따라 더욱 편하고 안락한 삶을 원하게 되었다. 인간의 손으로 변경하던 TV 채널은 리모컨의 사용으로 대체되었고 이제는 음성이나 제스처를 통해 간편하게 조정하거나 사용자의 생활 패턴을 알아내어 자동으로 채널을 추천해 주는 기술까지 개발되고 있다[1].

하지만, 감성을 고려하지 않은 가정용 자동화 기기의 발전은 노인이 홀로 지내는 시간이 많아지게 하고 우울증과 같은 정서 장애를 초래할 수도 있다. 노인에게는 감성 상태가 더욱 중요한데, 의사 결정이나 기억, 어떤 상황에 대한 반응뿐만 아니라 신체적인 건강 상태에까지 영향을 미치기 때문이다[2]. 이와 같은 정서적인 보살핌을 위해 피아노 연주 로봇은 대안이 될 수 있으며, 건강한 여가 활동을 제공하고 좋은 정서 상태를 유지할 수 있도록 도와준다.

본 논문에서는 피아노 연주 로봇의 여러 가지 구성 요소 중에서 사용자의 손짓을 인식하여 연주의 속도를 조정하는 방법과 피아노를 연주하기 위해 로봇 손가락을 제어하는 방법에 대해 다룬다. 이를 위해 먼저 제 2절에서는 사용자의

손짓에 의한 비트 제스처를 인식하기 위해 옵티컬 플로우(Optical Flow)에 기반한 추정 방법을 제안하고, 3절에서는 반복 학습 제어 기법을 이용한 제어 방법을 설명한다. 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

2. 비트 제스처 인식

본 절에서는 사용자가 노래를 할 때 박자를 표현하는 비트 제스처를 인식하여 피아노 연주 속도를 조정하기 위한 방법을 설명한다. 판매되고 있는 노래 반주기의 경우에는 리모컨을 이용하여 박자를 조정하는데, 불편할 뿐 아니라 사용자의 미묘한 느낌을 전달하지 못하고 속도가 미세하게 조절되지 않는다. 좀 더 인간친화적인 방법으로, 사용자가 노래를 할 때 자연스럽게 취하는 손짓이나 몸짓을 인식하여 연주 속도를 바꿀 수 있다.

이러한 비트 제스처 인식을 위해 많은 연구가 진행되었는데[3], 몸에 색상 표식을 부착하거나 단순한 삼각함수로 근사화 하는 등 많은 제약을 가지고 있다. 본 논문에서는 좀 더 현실적으로 사용이 가능하도록 2차원 평면에서의 움직임이라는 가정 하에 몸이나 머리, 손 등 어떠한 신체 부위로 박자를 표현하더라도 인식할 수 있도록 하였다.

2.1 동작 검출

연속된 영상에서 신체의 움직임을 알아내기 위해 옵티컬 플로우 방법을 사용하였다. 무게 중심에 대한 추정 오차를 줄이기 위해 우선 그림 1과 같이 연속적인 3개의 영상에 대해 옵티컬 플로우를 구한 후 AND 연산을 취하여 노이즈를 제거하였다. 각각의 영상에 대해 무게 중심을 구하고 x축과 y축에 대한 무게 중심 궤적을 구하였다(그림 2). 하지만, 신체 부위는 강체가 아니기 때문에 그림 3과 같이 노이즈가 여

저자 소개

* 박광현: 한국과학기술원 전자전산학과 초빙교수

** 정성훈: 한국과학기술연구원 인지로봇연구단 연구원

*** C. Pelczar: 한국전자통신연구원 연구원

**** T.V. Hoang: Hanoi Univ. of Technology 전임강사

***** 변증남: 한국과학기술원 전자전산학과 교수

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음 (R11-1999-008)

전히 존재하며 추정 오차를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 식 (1)과 같이 2차 및 3차의 정규화된 중심 모멘트를 구하였다.

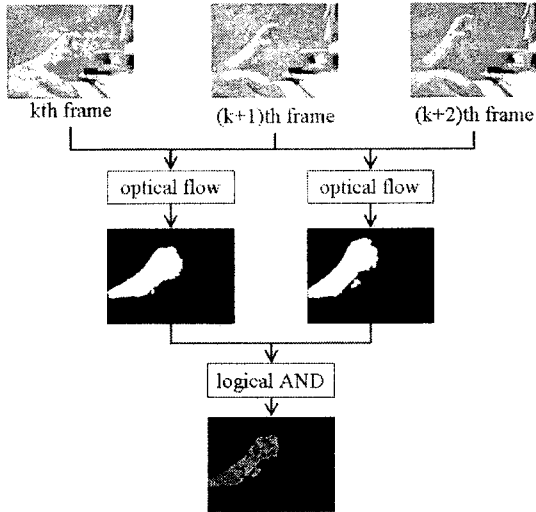


그림 1. 옵티컬 플로우를 사용한 동작 검출

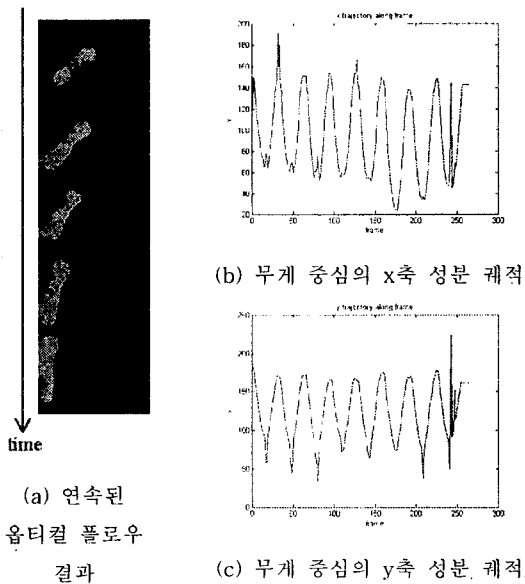


그림 2. 팔의 주기적인 운동

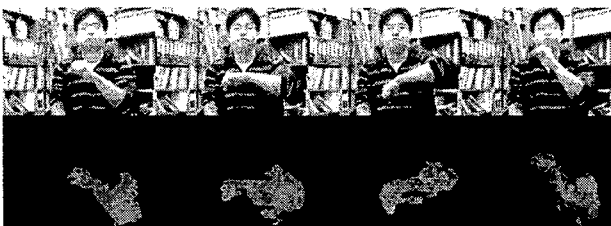


그림 3. 노이즈가 있는 옵티컬 플로우 결과

$$\eta_{mn} = \frac{\mu_{mn}}{M_{00}^{(m+n)/2+1}} \quad (1)$$

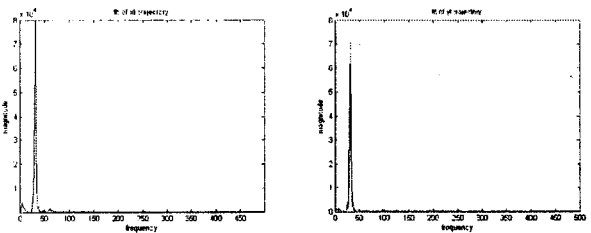
$$M_{mn} = \sum_{x,y} I(x,y)x^m y^n$$

$$\mu_{mn} = \sum_{x,y} I(x,y)(x-\bar{x})^m (y-\bar{y})^n$$

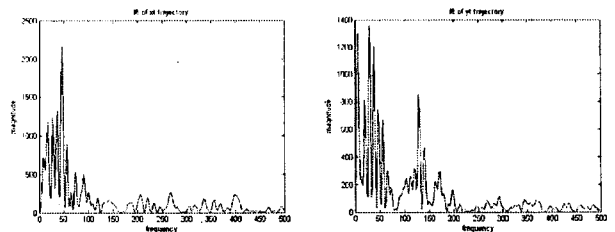
$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}}$$

2.2 동작 주기 추정

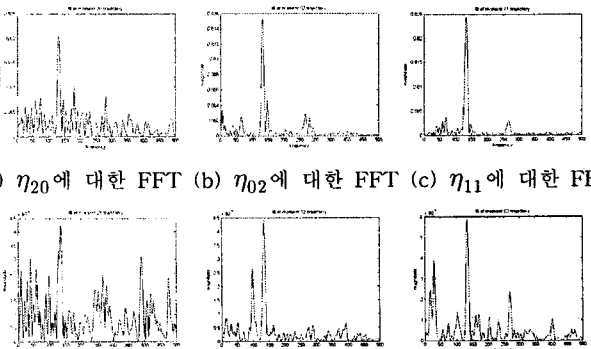
동작의 주기를 추정하기 위해 우선 무게 중심의 궤적에 대해 빠른 푸리에 변환(FFT)을 사용하였다. 그림 2와 4에서 볼 수 있듯이 옵티컬 플로우의 결과가 깨끗하면 FFT의 결과가 최고점을 뚜렷하게 하고 주기를 잘 얻을 수 있다. 하지만, 그림 3과 같이 노이즈가 존재하는 경우에는 그림 5와 같은 FFT 결과를 얻고 주기를 알기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 그림 6과 같은 정규화된 중심 모멘트의 궤적을 구하고 무게 중심의 궤적과 함께 모두 9개의 FFT 결과를 얻는다. 이 중 다른 것과 많은 차이를 보이는 결과를 적절한 문턱값을 사용하여 제거하고 평균을 구하여 주기의 추정값으로 사용하였다.



(a) x축 성분에 대한 FFT (b) y축 성분에 대한 FFT
그림 4. 그림 2에 대한 FFT 결과



(a) x축 성분에 대한 FFT (b) y축 성분에 대한 FFT
그림 5. 그림 3에 대한 FFT 결과



(a) η_{20} 에 대한 FFT (b) η_{02} 에 대한 FFT (c) η_{11} 에 대한 FFT

(d) η_{21} 에 대한 FFT (e) η_{12} 에 대한 FFT (f) η_{03} 에 대한 FFT

그림 6. 정규화된 중심 모멘트에 대한 FFT 결과

3. 로봇 손가락의 동작 제어

3.1 반복 학습 제어

로봇 손가락의 움직임에 약간의 오차가 있더라도 실제로 연주되는 피아노 소리에는 큰 차이가 발생한다. 따라서 로봇의 손가락을 정밀하게 제어하는 것이 필요하다. 하지만, 개발된 로봇 손가락은 동역학 특성이 복잡하고 로봇 손가락이 피아노 건반을 누를 때 동역학 특성이 변하기 때문에 정확한 수학 모델을 얻기가 어렵다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 정확한 모델이 없이도 반복 수행을 통해 정밀한 제어를 할 수 있는 식 (2)의 반복 학습 법칙[4]을 적용하였다.

$$u_k(t) = r_k(t) - \alpha_k \Gamma \begin{bmatrix} \theta_{1,k}(t) \\ \theta_{2,k}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_{1,d}(0) \\ \theta_{2,d}(0) \end{bmatrix}, t \in [0, T] \quad (2)$$

$$r_{k+1}(t) = r_k(t) + \alpha_k \Gamma \begin{bmatrix} \theta_{1,d}(t) - \theta_{1,k}(t) \\ \theta_{2,d}(t) - \theta_{2,k}(t) \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + \beta (\sqrt{SSE(\theta_{1,k})} + \sqrt{SSE(\theta_{2,k})})$$

여기서, $u_k(\cdot)$ 는 시간 구간 $[0, T]$ 에 대한 k 번째 시행 시의 제어 입력, $\theta_{1,d}(\cdot)$ 와 $\theta_{2,d}(\cdot)$ 는 주어진 목표 궤적, $\theta_{1,k}(\cdot)$ 과 $\theta_{2,k}(\cdot)$ 는 첫 번째, 두 번째 관절의 출력 궤적, SSE는 오차 제곱의 합을 나타낸다. 초기값 α_0 와 이득값 Γ 는 시스템의 안정성 및 반복 학습 제어의 수렴 조건을 만족하도록 설정한다.

3.2 실험 결과

실험을 위해 목표 궤적을 식 (3)과 같이 설정하고, 외란을 그림 7과 같이 부가하였다. 시간 구간 $[0, 4]$ 에 대해 초기값은 식 (4)와 같이 설정하고 이득값은 식 (5)와 같이 주었다.

$$\theta_{1,d}(t) = \frac{1}{6} \sin(\pi t), \theta_{2,d}(t) = \frac{1}{6} \sin(2\pi t) \quad (3)$$

$$\theta_{1,k}(0) = \theta_{2,k}(0) = 0, \dot{\theta}_{1,k}(0) = \dot{\theta}_{2,k}(0) = 0 \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_{1,k}(0) = \ddot{\theta}_{2,k}(0) = 0, \alpha_0 = 0.05$$

$$\beta = 0.002, \Gamma = [PLK] \quad (5)$$

$$P = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 65 & 0 \\ 0 & 65 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 2.5 \end{bmatrix}$$

그림 8은 $\theta_1(t)$ 와 $\theta_2(t)$ 에 대한 목표 궤적과 출력 궤적을 보여준다. 반복 시행이 진행됨에 따라 출력 궤적이 목표 궤적을 정확하게 따라감을 볼 수 있으며, 외란에 의한 효과는 사라짐을 알 수 있다. 그림 9는 θ_1 과 θ_2 에 대한 SSE 값을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 노인의 감성적인 상태를 보살피기 위한 피아노 연주 로봇을 소개하고, 로봇의 연주 속도를 조정하기 위해 비트 제스처를 인식하는 방법을 보였다. 또한, 로봇 손가

락의 정밀한 제어를 위해 반복 학습 법칙을 적용한 결과를 보였다. 좀 더 실질적인 적용을 위해 소리 크기 등의 다른 음악 요소를 같이 조정할 수 있는 방법과 다양한 실험을 통한 검증이 앞으로 필요하다.

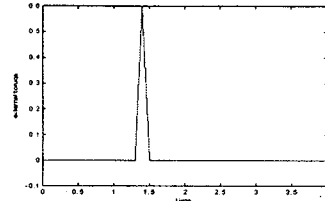
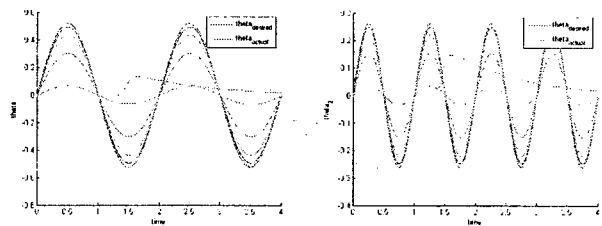


그림 7. 손가락 관절에 부가된 외란



(a) θ_1 에 대한 결과

(b) θ_2 에 대한 결과

그림 8. 목표 궤적과 출력 궤적

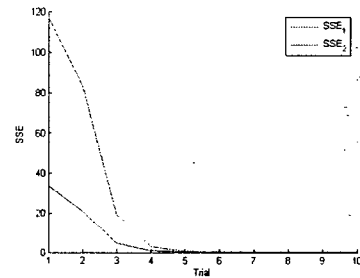


그림 9. 오차 궤적

참 고 문 헌

- [1] Park, K.-H., Bien, Z., Lee, J.-J., Kim, B.K., Lim, J.-T., Kim, J.-O., Lee, H., Stefanov, D.H., Kim, D.-J., Jung, J.-W., Do, J.-H., Seo, K.-H., Kim, C.H., Song, W.-G., Lee, W.-J., "Robotic Smart House to Assist People with Movement Disabilities," *Autonomous Robots*, vol. 22, no. 2, pp. 183-198, 2007.
- [2] Luukinen, H., Laippala, P., Huikuri, H., "Depressive Symptoms and the Risk of Sudden Cardiac Death among the Elderly," *European Heart Journal*, vol. 24, no. 22, pp. 2021-2026, 2003.
- [3] Tsai, P., Shah, M., Keiter, K., Kasparis, T., "Cyclic Motion Detection for Motion Based Recognition," *Pattern Recognition*, vol. 27, no. 12, pp. 1591-1603, 1994.
- [4] Moore, K., *Iterative Learning Control for Deterministic Systems*, Springer-Verlag, 1993.