

Hough변환을 이용한 정자의 형태학적 특성 분석방법에 관한 연구

박광석·이원진*·백재승**

= Abstract =

A Study on the Morphological Analysis of Sperm Using Hough Transform

Kwang Suk Park, Won Jin Yi*, Jae Seung Paick**

A new analytic method has been developed for the analysis of sperm morphology using Hough transform. This method is based on the characteristic that sperm heads have elliptic shape in addition to the density difference with the background. Sperm heads are represented in elliptic form with five parameters, and the optimal parameters are estimated by iterative Hough transform. To reduce processing time practically, we restricted the transformed space in minimum volume and moved the searching volume to the maximum gradient for the estimated error. Morphological parameters were calculated from estimated sperm head boundaries without further processing.

Key words : Sperm, Morphology, Analysis, Image, Hough transform

서론

정자의 형태학적 특성의 분석은 정자의 운동특성 분석 방법과 함께 정액 분석의 객관적이고 정량적인 분석방법으로 비뇨기과학 및 산부인과학 영역에서 급속하게 도입되어 활용되고 있다^{1,2)}. 정자의 운동 특성의 분석은 가임여부의 중요한 지표를 제공하여 활용하고 있다. 그러나, 정자의 특성을 보다 정확하게 분석하기 위하여는 정자의 형태학적 특성의 분석의 필요성이 제안되고 있다³⁾. 비정상적인 형태의 정자에서의 가임력이 정상적인 형태의 정자군에 비하여 운동성이 현저하게 감소된다는 것이 보고되었으며, 정상인에서의 정상적인 정자의 비율이 가임력이 저하된 환자 군에 비교하여 높은 것으로 보고되어 정자의 형태학적인 특성이 가임력에 중요한 지표로 활용될 수 있음을 보여주었다^{4,5)}. 또한 정자의 형태학적인 특성의 분석은 물리적인 환경과 화학 약품 등의 영향력 분석 등

여러 가지의 정액의 정량적 분석에 표준 방법으로 이용되고 있다⁶⁾.

정자의 형태학적인 분석에서 수동적으로 현미경 시야에 나타난 정자의 외형을 추적하는 방법은 관찰자마다의 기준이 주관적이고 동일 관찰자 내에서도 정확한 기준의 설정이 어려워서 임상적으로 크게 활용되고 있지 못하여 이를 위한 객관적이고 정량적인 방법의 필요성이 대두되어 왔다. 이를 위하여 이미 정자 형태의 객관적인 분석을 위한 방법들이 개발되어 Cell Track사 및 Hamilton사등에서는 일부 제품화된 것들도 있다. 그러나 정자의 형태학적 특성의 분석의 경우에는 아직 완전 자동화된 수준까지 개발되고 있지는 못한 단계이며, 사용자가 화면상에서 선택한 정자에 대하여 형태적 특성을 분석하는 반자동적인 수준에 머물러 있다.

정자의 형태적 특성의 분석에서 중요하게 사용하는 정보는 정자의 머리부분의 화면상에서의 밝기가 주위의 배

서울대학교 의과대학 의공학교실

Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Seoul National University

*서울대학교 대학원 의용생체공학협동과정

*Interdisciplinary Program in Medical and Biological Engineering, Seoul National University

**서울대학교 의과대학 비뇨기과학교실

**Department of Urology, College of Medicine, Seoul National University

†본 연구는 1994년도 서울대학교병원 지정진료연구비 지원에 의하여 이루어졌음

통신저자 : 박광석, (110-744) 서울특별시 종로구 연건동 28, Tel. (02)740-8595

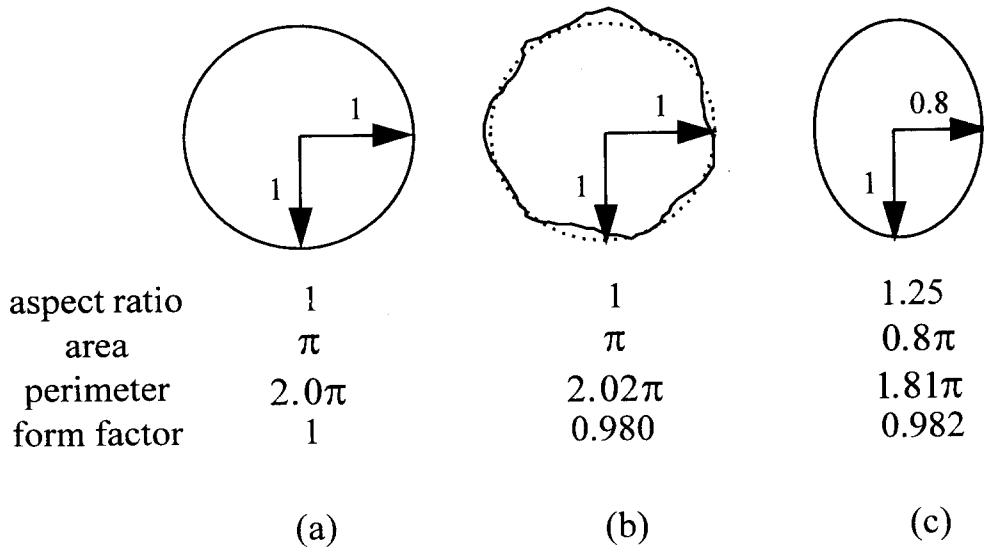


그림 1. 타원과 비교한 둘레 길이의 미세한 변화의 형태적 특성 지표에의 영향
 Fig. 1. Effect of minute variation of perimeter on morphological parameter compared with ellipse

경과 다르다는 사실이다. 그러나 정자의 머리 부분에서도, acrosome 부분과 post acrosome 부분과의 밝기의 차이가 있고, 주위 배경의 밝기의 차이도 다르기 때문에 이에 커다란 영향을 받지 않고 효율적으로 정자의 형태를 검출하는 방법이 연구되어 오고 있다^{7,9,10)}. 그러나, 정자의 형태의 검출에는 정자의 머리부분이 갖는 밝기의 차이 이외에 정자라고 인식하는 일정한 형태를 갖고 있다는 것을 정자의 형태 인식에 이용하면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 관찰자들이 현미경 시야에서 정자의 형태를 개념적으로 타원형으로 인식한다는 것에 착안하고, 타원의 위치, 크기 및 방향을 검출하기 위한 방법으로 Hough 변환을 변형된 형태로 활용하였다. 이 방법을 이용하여 정자의 머리부분을 나타내는 타원의 파라미터를 구한후에, 정자의 형태학적 특성을 나타내어 주는 특성 지표들을 계산하였다.

1. 정자의 형태학적 특성 지표

표 1에는 정자의 형태학적 특성을 나타내기 위하여 사용하는 주요 지표들을 나타내었다⁷⁾. 여기에 나타낸 특성 지표들은 기본적인 특성을 나타내는 1차적인 특성 지표와 여기에서부터 계산 될 수 있는 2차적인 특성 지표로 나눌 수 있다. 이밖에도 정자의 방향 및 머리부분의 밝기 및 프로파일에 관한 지표를 추가할 수 있다.

정자의 형태를 검출하는 일반적인 방법에서는 정자의 형태에 대하여 특정한 가정을 하지 않고 정자의 머리부분에서 관찰되는 밝기의 차이에만 근거하여 1차적인 특성 지표들을 계산한다. 이러한 경우에 길이(length), 폭(width) 및 면적(area)에 대하여는 도출한 특성지표들이 검

출에 사용한 파라미터나 영상 처리 방법에 민감하게 반응하지 않을 수 있으나, 둘레의 길이(perimeter)의 경우에는 검출에 사용되는 방법 및 스무딩의 적용여부에 따라서 그 값이 변할 수 있다. 둘레가 부드럽게 검출되지 않은 경우에는 미세한 정자의 경계부분의 요철에 의하여 전체의 둘레는 증가한다. 실제로 정자의 면적과 대략적인 형태는 유지하면서, 그 둘레는 수학적으로는 무한대까지 증가할 수 있다. 이러한 정자의 둘레의 작은 변화는 form factor와 ruffle 등 2차적인 파라미터의 계산에 크게 영향을 미칠 수 있다. 그림 1에는 둘레의 길이가 1% 증가한 경우의 원과 aspect ratio가 1.5인 타원과의 형태적인 특성 지표들을 비교하였다. 여기에서 볼 수 있듯이 1%의 둘레의 차이가 25%의 aspect ratio보다 form factor와 ruffle의 계산에는 더 크게 영향을 주고 있음을 볼 수 있다. 따라서 둘레의 길이가 정확하게 계산되지 못하는 경

표 1. 정자의 형태적 특성을 나타내는 지표들

Table 1. Parameters representing morphological characteristics of sperm

그 룰	지 표	표 현 식
1차 특성지표	Length	L
	Width	W
	Perimeter	P
	Area	A
2차 특성 지표	Aspect ratio	L/W
	Ellipticity	$ L - W / L + W $
	Form factor	$4\pi A / P^2$
	Ruffle	$4\pi A / P^2 (L/W)$

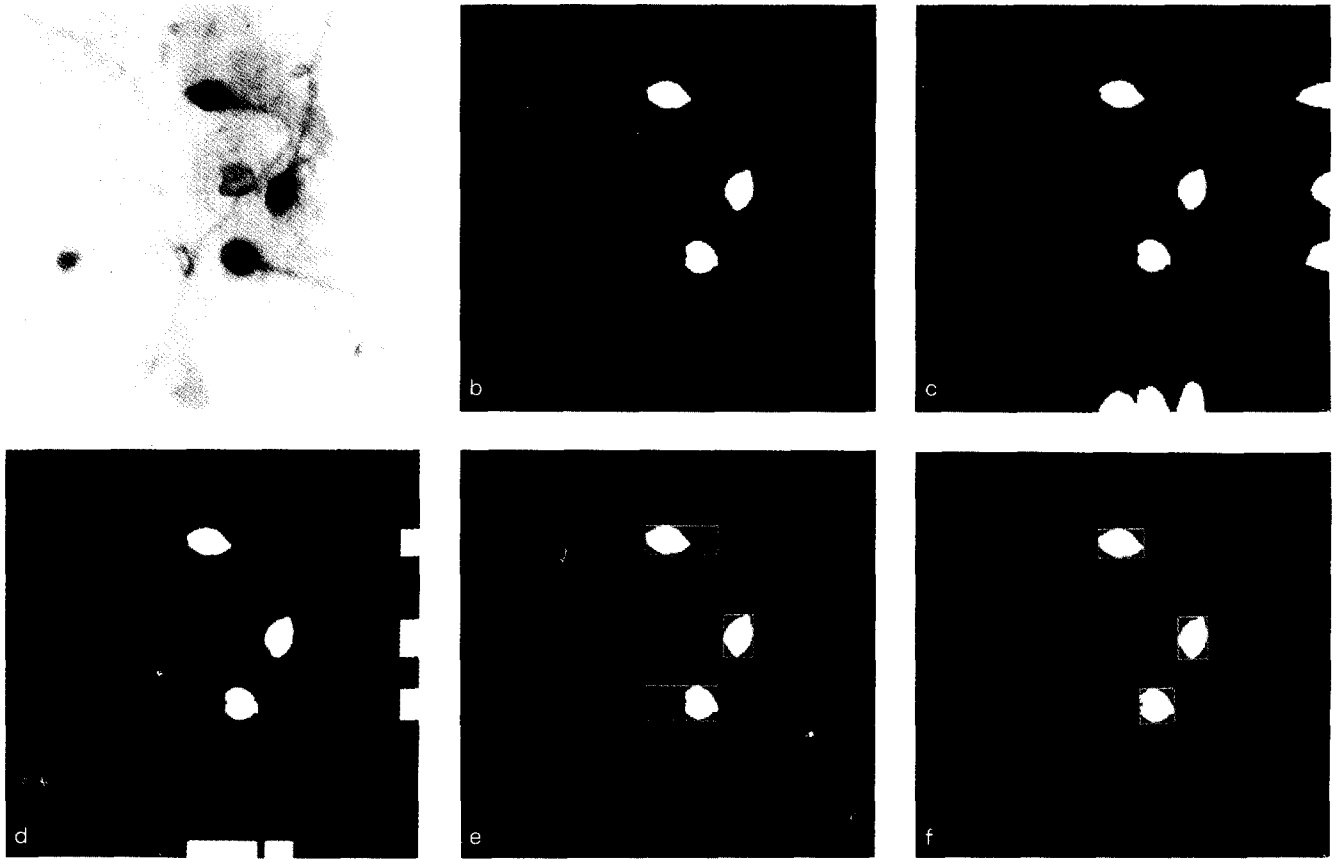


그림 2. 정자의 머리부분 영역의 선택을 위한 처리과정의 영상들
 (a)원래의 영상, (b)이진화된 영상, (c)이진화된 영상으로부터 구해진 프로젝션 프로파일, (d)정자의 머리부분으로 선택된 밴드, (e)1차적으로 선택된 정자의 머리부분의 영상, (f)최종적으로 선택된 정자의 머리부분의 영상

Fig. 2. Processed images during the selection of sperm head region

(a)original image, (b)binary image using the preset threshold, (c)projection profiles from binary image, (d)selected bands for the sperm head region, (e)initially estimated sperm head region (f)finally selected sperm head region

우에는 form factor와 ruffle 등을 유용한 형태학적 지표로 사용하기 어려움을 볼 수 있다.

2. 영상 수집 방법

정자의 형태학적 특성을 분석하기 위한 영상은 1000배의 배율을 갖는 광학 현미경을 이용하여 수집하였다. 정액은 diff-quick방법으로 염색을 시행한 후 현미경 시야에서 관찰되었다. 특성의 분석에 사용하기 위한 영상은 CCD 카메라를 이용하여 전기 신호로 변환한 후에 PC내에 내장한 영상 수집 보드에 의하여 가로 512개의 화소, 세로 480개의 화소를 갖고 각각의 화소는 256개 값중의 하나를 갖을수 있도록 수집되었다. 영상 데이터가 PC에서 수집된 후, 영상의 처리와 분석은 데이터를 네트워크를 이용하여 Sun/Sparc2워크스테이션으로 옮긴 후에 시행하였다.

3. 정자 머리부분의 영역 선택

본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 정자의 형태를 검출하기 위하여는 정자의 대략적인 위치를 영상처리의 방법으로 추정하여야 한다. 정자의 머리부분의 영역을 선택하기 위하여 사용한 방법은 다음과 같다.

- (1) 영상을 사전에 분석된 최적의 경계값을 이용하여 이진 영상화 하여 정자의 머리에 해당하는 부위와 나머지 부분을 구별하도록 한다.
- (2) 이진 영상에 대하여 수평방향과 수직 방향으로 화소값을 합하여 각 방향의 프로파일을 구한다.
- (3) 수평 프로파일과 수직방향의 프로파일에서 화소의 갯수가 어느 경계값이상인 상태가 정자의 평균 길이 이상 계속되면, 그 부위를 정자가 존재하는 수평 또는 수직 밴드로 정한다.
- (4) 수평밴드와 수직 밴드가 교차하는 부분을 정자의 머리부분이 존재하는 영역이라고 선정한다.

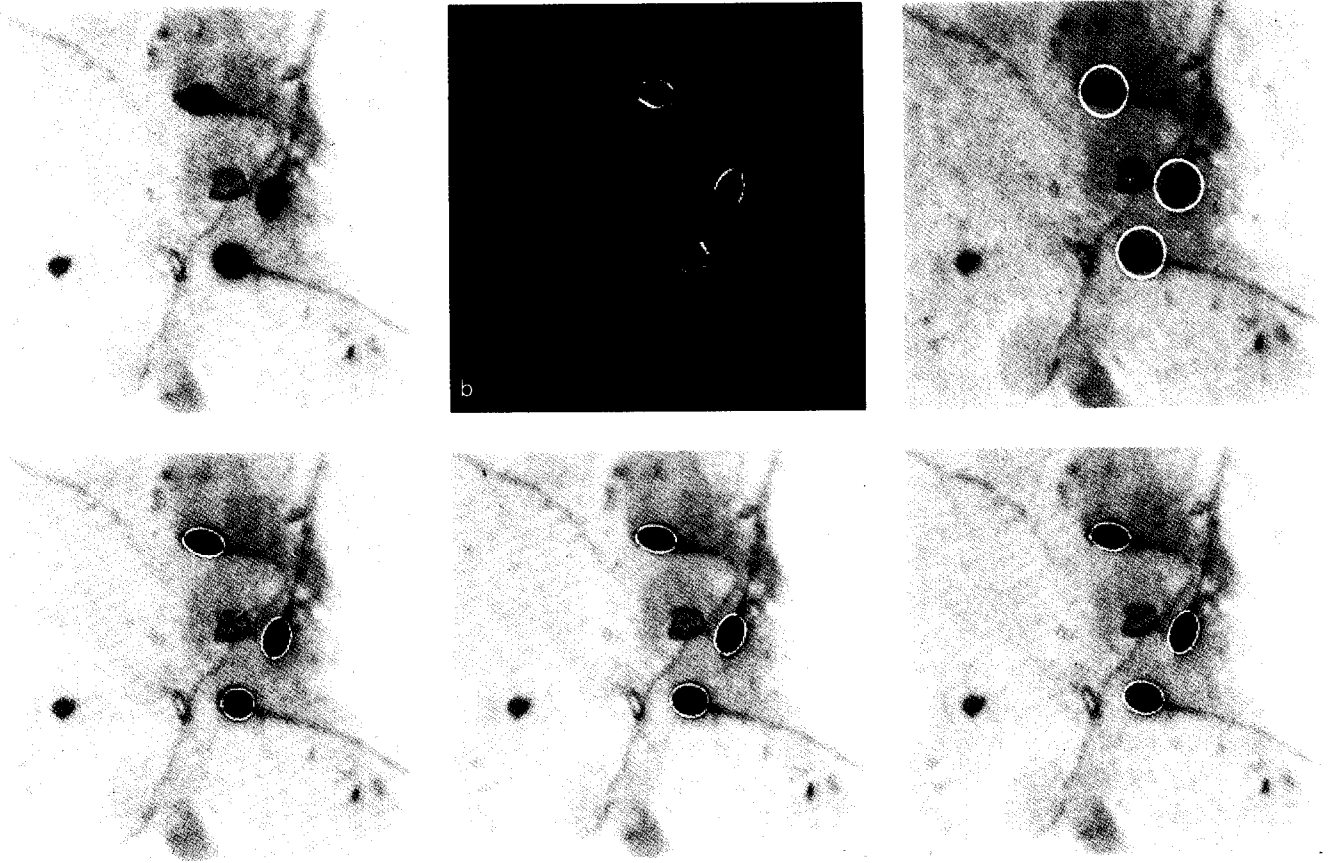


그림 3. 휴 변환을 이용한 정자의 경계검출을 위한 처리 과정의 영상들

(a) 원래의 영상, (b) 검출에 이용된 경계 화소의 영상, (c) 선택된 영역에 의하여 원형으로 초기화된 정자 경계의 영상, (d) 세 화소 단위 길이로 검출된 최적의 경계, (e) 두 화소 단위 길이로 검출된 최적의 경계, (f) 최종적으로 검출된 정자의 머리부분의 경계 영상
 Fig. 3. Estimated and processed image during the searching procedure using iterative Hough transform

(a) original image, (b) edge image used in searching procedure, (c) boundaries estimated from selected rectangular sperm head regions, (d) optimally estimated elliptic boundaries with three pixel accuracy, (e) optimally estimated elliptic boundaries with two pixel accuracy, (f) finally estimated optimal boundaries with one pixel accuracy

(5) 선택된 영역에 정자가 존재하는지 확인한다. 정자가 존재하지 않는 영역은 후속 검출 대상영역에서 제외한다.

(6) 선택된 영역이 정자의 머리부분보다 크게 나타날 수 있기 때문에 선택된 영역 내에서 앞의 (2)-(5)과정을 다시 한번 반복하여 정자의 영역을 나타내는 직사각형 형태의 영역을 선택하도록 한다.

그림 2에는 정자의 머리부분의 선택을 위한 영상 처리의 과정을 단계적으로 나타내었다.

4. 반복적 Hough 변환 방법

선택된 정자의 머리부분에 대하여 최적으로 그 경계를 나타내는 타원을 검출하기 위하여 Hough 변환 방법을 이용한다. Hough 변환은 영상내에서 직선, 원, 타원등 고정된 형태를 검출하기 위하여 사용하는 방법으로, 영상내의 각 화소에 대하여 이 화소가 속할수 있는 형태에 해당하는 accumulator cell의 값을 하나씩 증가 시킨후, 일정한

값이상의 accumulator cell 값을 갖는 경우에 그 accumulator cell에 해당하는 도형이 영상내에 존재한다고 판단하는 것이다⁸⁾. 이 방법은 직선과 원같이 2~3개의 파라미터로 표현되는 도형에는 적용된 적이 있다. 타원은 두 개의 중심을 나타내기 위한 4개의 좌표와 원주 상에서 두 중심까지 거리의 합의 다섯개의 파라미터로 표시된다⁹⁾. 다섯개의 파라미터를 갖는 도형을 검출하기 위하여 Hough 변환을 직접 적용하는 것은 실제로 불가능하다. 전 단계에서 선택된 정자의 머리부분의 영역 내에 정자의 형태를 나타내는 타원의 두 중심이 존재한다고 가정하고 두 중심까지의 거리의 합의 정자의 실제적인 크기에 의하여 일정한 범위 내로 제한된다고 하더라도 Hough 변환된 공간 내에서 accumulator cell의 개수가 너무 많아서 실질적인 계산이 불가능하다. 예를 들어서 정자의 선택 영역이 가로로 40화소 세로로 50화소이고 정자의 크기에 의하여 두 중심까지의 거리의 합의 범위가 30화소

수 내지 70화소의 범위 내라고 가정하는 경우에 accumulator cell의 갯수는 $50 \times 40 \times 50 \times 40 \times 40 = 160,000,000$ 에 이르러서 실제적인 계산이 불가능하게 된다. 본 연구에서는 Hough 변환된 공간의 크기를 줄이기 위하여 다음과 같이 반복적인 방법을 사용하였다.

(1) 선택된 영역내의 모든 화소에 대하여 다음과 같은 방법으로 기울기의 강도를 계산한다. 수평방향 기울기의 절대 값과 수직 방향 기울기의 절대 값을 식 (1),(2)와 같이 계산하고 이 두개의 값을 합하여 해당되는 화소에서 기울기 강도로 계산한다.

$$f_{\text{diff-horizontal}}(x,y) = | f(x-1,y-1) + f(x-1,y) + f(x-1,y+1) - f(x+1,y-1) - f(x+1,y) - f(x+1,y+1) | \quad (1)$$

$$f_{\text{diff-vertical}}(x,y) = | f(x-1,y-1) + f(x,y-1) + f(x+1,y-1) - f(x-1,y+1) - f(x,y+1) - f(x+1,y+1) | \quad (2)$$

$$f_{\text{diff-total}}(x,y) = f_{\text{diff-horizontal}}(x,y) + f_{\text{diff-vertical}}(x,y) \quad (3)$$

(2) 계산된 기울기의 강도가 일정값 이상인 화소들을 Hough변환의 계산에 이용하도록 경계 값을 이용하여 화소들을 선택한다.

(3) 검출하기 위한 타원의 초기 형태를 원형으로, 두개의 중심이 모두 선택된 영역인 직사각형의 중심에 위치하는 것으로 가정한다. 정자의 길이에 해당되는 두 중점까지 거리의 합은 정자의 평균 길이로 초기화한다.

(4) 파라미터사이의 간격을 세 화소 길이가 되도록 accumulator cell의 단위 간격을 설정하였다.

(5) 현재의 파라미터를 중심으로 하여 한 단위 간격씩 큰 값과 작은 값을 각각 설정하여 각 파라미터마다 세개씩의 파라미터를 설정한다. 이렇게 타원의 형태를 나타내는 다섯개의 파라미터에 대하여 세개씩의 파라미터를 설정하는 경우에는 accumulator cell의 갯수는 $3^5 = 243$ 개가 된다(8).

(6) 앞의 (2)의 과정에서 선택된 모든 화소에 대하여 (5)에서 설정한 값을 갖는 타원까지의 거리를 계산하여, 이 값을 오차로 간주하고 식 4와 같이 평균한다.

$$e(i,j,k,l,m) = \frac{1}{2N} \sum_{p=0}^N | \sqrt{(X_p - A_{xi})^2 + (Y_p - A_{yi})^2} + \sqrt{(X_p - B_{ik})^2 + (Y_p - B_{il})^2} - D_m | \quad (4)$$

여기서 X_p, Y_p 는 기울기 강도가 경계값 이상이어서 선택된 화소의 x 및 y 좌표이고, $A_{xi}, A_{yj}, B_{xk}, B_{yl}, D_m$ 은 해당되는 accumulator cell이 나타내는 타원의 두 중심의 x 및 y 좌표와 타원의 길이이다. 식4와 같이 계산된 오차는 그 파라미터에 의하여 표현되는 타원이 검출에 사용된 화소들과의 평균 거리를 나타내어 주므로, 해당되는 타원이 얼마나 실제의 경계에 가까운가를 나타낸다고 볼수 있다.

(7) 243개의 모든 accumulator cell에 대하여 구한 평균 오차를 기준으로 최소 값을 갖는 accumulator cell을 선택하여 그 파라미터를 타원을 나타내는 새로운 파라미터로 치환한다.

(8) (7)의 단계에서 구한 파라미터를 이용하여 (5)부터 (7)의 과정을 최소 평균 오차를 갖는 accumulator cell의 파라미터의 값이 더 이상 변화하지 않을 때까지 반복한다.

(9) 파라미터사이의 간격을 두 화소 길이가 되도록 줄여서 accumulator cell의 단위 간격을 설정한 후, (5)부터 (8)의 과정을 반복한다.

(10) 파라미터사이의 간격을 다시 한 화소 길이가 되도록 줄여서 accumulator cell의 단위 간격을 설정한 후, (5)부터 (8)의 과정을 반복한다.

그림 3은 앞에 기술한 각 단계에서의 영상을 보여 주고 있다.

5. 형태학적 지표의 계산

정자의 경계를 나타내는 최적의 타원의 형태가 계산되면, 정자의 길이, 폭, 둘레 및 면적을 다음과 같은 수식으로 더 이상의 영상 처리 방법을 사용하지 않고 계산한다.

$$Length = D_M \quad (5)$$

$$Width = \sqrt{D_M^2 - (A_{xM} - B_{xM})^2 - (A_{yM} - B_{yM})^2} \quad (6)$$

$$Perimeter = \pi * Length * (1 - (\frac{1}{2})^2 K - \frac{1}{3} (\frac{1*3}{2*4})^2 K^2 - \frac{1}{5} (\frac{1*3*5}{2*4*6})^2 K^3 - \dots) \quad (7)$$

$$Area = \pi * Length * Width / 4 \quad (8)$$

여기서 $A_{xM}, A_{yM}, B_{xM}, B_{yM}, D_M$ 은 도출된 최적의 파라미터 값을 나타낸다.

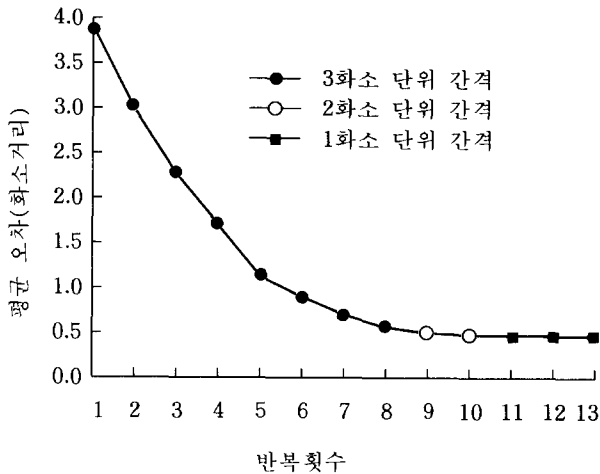


그림 4. 최적 경계값의 검출 과정 동안의 평균 오차의 감소 형태.
Fig. 4. Decreasing of mean absolute error during the parameter searching procedure

결 과

정자의 형태를 나타내는 최적의 타원을 도출하는 과정에서 초기의 세 화소 길이의 accumulator cell 간격을 두 화소 길이, 한 화소 길이로 순차적으로 줄이면서 최적의 값을 도출하였다. 이 과정에서 감소되는 평균 오차의 변화를 그림 4에 보였다. 이 그림에서 보듯이 초기의 3.89 화소거리로 해당하는 평균 오차의 값이 최종적으로 0.41 화소거리로 줄어서 평균 반 화소거리 이내로 정자의 머리 부분의 경계가 검출되었음을 알 수 있다. 또한 Hough 변환을 직접 적용하는 경우에 accumulator cell의 갯수인 160,000,000개에 비교하여 243개의 accumulator cell에 대하여 13번의 반복적인 계산을 하였을 뿐이므로 약 50,000분의 1로 처리 속도를 향상시켜, 실제적인 적용이 가능하게 되었다. 본 연구에 사용된 4개 영상의 9개의 정자에 대하여 평균 0.47 화소거리를 갖고 경계 값이 검출되었다. 표 2는 그림 3에 보인 영상에 대하여 도출된 타원의 파라미터들과 이 값을 이용하여 계산한 1차 형태학적 지표 및 2차 형태학적 지표의 값을 보여주고 있다.

검 토 및 결 론

정자의 형태학적인 특성의 분석은 정상적인 형태를 비정상적인 형태로부터 구별하는 것이다. 비정상적인 정자의 형태는 분류에 따라서 그 종류가 다양하다^[11]. 대부분 그 형태가 타원형에 가까운 경우에는 크기와 폭에 의하여 구분되고, 그 밖에 일부 타원 이외의 형태를 갖는 정자의 형태로 구분할 수 있다. 정자를 타원의 형태로 검출하는

표 2. 그림 3에서 검출된 정자의 경계를 나타내는 파라미터 및 이 파라미터에서 도출된 1차 형태학적 지표 및 2차 형태학적 지표의 값.(1화소거리 = 0.08 m)

Table 2. Estimated and calculated morphological parameters for the sperms shown in Figure 3.(1 pixel distance = 0.08 m)

	파라미터	정자1	정자2	정자3	평균값
도출된 파라미터	A_{VM}	273	274	331	
	A_{vM}	114	290	239	
	B_{sM}	230	303	345	
	B_{vM}	107	298	203	49.7
	D_M	52	47	50	0.47
	Mean error	0.49	0.53	0.40	
	Length	52	47	50	49.7
1차 형태학적 특성지표	Width	2.84	36.1	31.8	32.1
	Perimeter	129	131	130	130
	Area	1159.5	1333.0	1246.8	1246.4
	Aspect ratio	1.83	1.30	1.57	1.57
2차 형태학적 특성 지표	Ellipticity	0.29	0.13	0.22	0.21
	Form factor	0.88	0.97	0.93	0.93
	Ruffle	1.60	1.27	1.46	1.44

경우에는 기존의 방법에 비교하여 형태적 특성을 잘 정량화 할 수 있으나, 그 형태가 타원의 형태로 보기에 다소 어려운 경우에는 본 연구에서 제시한 방법으로 도출한 경계가 어느 정도 오차를 보일 수 있다. 그러나, 이렇게 타원의 형태로 직접 표현하기 어려운 형태의 비정상적인 정자군에 대하여도 가장 근사화되는 타원의 형태를 기준으로 하여 비정상적 형태를 나타내는 특성 지표들을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

제안한 방법은 최대 기울기의 강도를 갖는 방향을 따라서 최적의 값들을 추적하여 가는 방법이므로 도출된 결과가 항상 최적의 값을 갖고 지역적인 최적 값을 결코 나타내지 않는다고 주장하기 어렵다. 그러나, 본 실험의 과정에서 사용된 모든 영상에 대하여 정자의 머리 부분의 영역 내에 한 개의 정자만 포함된 모든 경우에 대하여는 발산하지 않고, 영상에서 판단하기에 최적의 값을 도출하였다. 또한 영상처리과정에서 사용한 경계 값의 변화에 따라서 도출되는 최적의 값이 차이가 나는 것을 볼 수 있었다. 이 부분에 대하여는 중간에 사용되는 경계 값에 덜 민감하면서 주어진 영상에 대하여 최적의 경계를 도출할 수 있도록 추가적인 연구가 시행되어야 한다고 생각된다.

본 연구에서는 정자의 형태를 타원으로 나타낼 수 있다고 가정하고, 최적의 경계를 나타내는 타원의 값을 Hough 변환의 변형된 형태를 활용하여 구하였다. 이렇게 도출된 형태의 파라미터를 이용하여, 정자의 형태학적 특성을 나타내는 파라미터들을 더 이상의 영상 처리를 시행

하지 않고 계산하였다. 이렇게 도출된 형태학적인 지표들은 정자의 정상 여부와 비정상군내에서의 세부적인 구분에 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. R. O. Davis, D. F. Katz, "Computer-aided sperm analysis: technology at a crossroads", *Fertil Steril*, Vol. 59, pp. 953-955, 1993.
2. D. Vantman, L. Dennison, S. M. Banks, R. J. Sherins, G. Koukoulis, "Assessment of sperm motion characteristics from fertile and infertile men using a fully automated computer-assisted semen analyzer", *Fertil Steril*. Vol. 51, pp. 156-161, 1989.
3. T. B. Hargraeve, S. Nilsson, *Seminology*. In: *Male Infertility*, Edited by T.B. Hargraeve, New York, Springer-Verlag, pp. 56-74, 1983.
4. D. F. Katz, L. Diel, J. W. Overstreet, "Differences in the movement of morphologically normal and abnormal human seminal spermatozoa", *Biol. Reprod.*, Vol. 26, pp. 566, 1982.
5. H. Krzanowska, "The passage of abnormal spermatozoa through the uterotubular junction of the mouse", *J. Reprod. Fertil.*, Vol. 38, pp.81, 1974.
6. A. J. Wyrobek, L. A. Gordon, J. G. Burkhart, M. W. Francis, R. W. Kapp Jr, G. Letz, H. V. Malling, J. C. Topham, M. D. Whorton, "An evaluation of human sperm as indicators of chemically induced alterations of spermatogenesis in man", *Mutation Res.*, Vol. 115, pp. 73, 1983.
7. J. F. Moruzzi, A. J. Wyrobek, B. H. Mayall, B. L. Gledhill, "Quantification and classification of human sperm morphology by computer-assisted image analysis", *Fertil Steril.*, Vol. 50, pp.142-152, 1988.
8. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Co., pp. 432-438, 1993.
9. J. R. Jago, N. P. Washbrook et. al., "Morphometry of spermatozoa using semiautomatic image analysis", *J. Clin. Pathol.*, Vol. 39, pp.1347-1352, 1986.
10. R. O. Davis, C. G. Gravance, "Consistency of sperm morphology classification methods", *J. Andr.*, Vol. 15, pp 83-99, 1994.
11. T. F. Kruger, R. J. Swanson, et. al., "Predictive value of abnormal sperm morphology in in vitro fertilization", *Fertil. & Steril.*, Vol. 49, pp. 112-117, 1988.

= 국문초록 =

Hough변환을 이용하여 정자의 형태학적 특성을 분석하는 새로운 방법을 개발하였다. 이 방법은 정자의 머리부분이 주위의 배경과 밝기의 차이를 갖는다는 특성과 함께 그 형태가 타원에 근접한다는 특성에 근거하고 있다. 정자의 머리부분은 타원을 나타내는 5개의 파라미터로 표현되고, 최적의 파라미터 값이 반복적인 Hough 변환에 의하여 검출된다. 일차적으로 정자가 있는 영역을 선택한다. Hough변환을 이용한 계산을 가능하게 하기 위하여 Hough변환된 공간의 크기를 최소한으로 줄이고, 검출된 오차가 최소화 되는 방향으로 검사 영역을 이동 시켜가며 최적의 파라미터들을 도출한다. 형태학적 특성을 나타내는 지표들은 정자의 형태를 나타내는 타원의 다섯개 파라미터들로부터 계산된다.