

磁振造影棘上肌電腦輔助診斷系統

歐陽昆^{a*} 林鎮江^{a,b} 王志男^a 白炳豐^c 傅家啟^a

^a 國立雲林科技大學 工業工程與管理學系

^b 國立台灣大學醫學院附設醫院 雲林分院 骨科部

^c 國立暨南大學 資訊管理學系

*g9621802@yuntech.edu.tw

摘要

目前診斷棘上肌損傷或斷裂，大多仰賴磁振造影(Magnetic resonance imaging, MRI)來做診斷，但由於直接擷取原始磁振造影影像有欠缺影像整體強化處理的缺點，導致影像對比不佳，造成量測效果有偏差，因此必須透過影像強化來增強影像整理對比，以輔助磁振造影影像的不足。本研究分析直方圖等化(Histogram Equalization)、加權直方圖分離法(Weighted Histogram Separation, WHS)與耦合加權直方圖分離法(coupled WHS)三種不同影像強化方式，利用峰值雜訊比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)來評估強化後影像之品質，透過ANOVA統計檢定之結果，coupled WHS無論在無受傷、撕裂傷或斷裂傷上，其影像失真率皆較低。再將結合原影像與coupled WHS影像強化，並給予三位骨科主治醫師進行診斷判定，利用F-measure來評估醫師診斷率。實驗結果顯示，結合原始影像及coupled WHS強化影像，可提升醫師診斷正確率。

Keywords: 磁振造影，影像強化，耦合加權直方圖分離法，棘上肌

1. 前言

旋轉肌群是由肩胛下肌(Subscapularis)、棘上肌(Supraspinatus)、棘下肌(Infraspinatus)與小圓肌(Teres Minor Muscles)所組成，而旋轉肌肌腱群(Rotator Cuff)為肩關節中主導上肢作上下及旋轉的重要肌腱組織，主要負責上肢手背上下、旋轉時的關節運動及平衡。當患者做不適當運動時可能會造成肌腱發炎或是斷裂(Tears)，其中又以棘上肌的損傷最為常見。其中棘上肌完全斷裂不會自然回復而必須要進行關節鏡的手術修補。目前診斷棘上肌損傷或是斷裂大多仰賴磁振造影(Magnetic resonance imaging, MRI)來做診斷，其原因為普通X光片只能檢視有無骨折、脫位、肩峰是否有骨刺、或有鈣化點，對於肌肉肌腱病變無助益，所以目前大多利用核磁共振造影(MRI)，進一步找出肩關節其他問題。

磁振造影(Magnetic Resonance Imaging, MRI)又稱為核磁共振，為其中一種重要的醫學影像取得的方法。透過電腦影像處理，即可呈現人體內部器官、組織結構及病灶的立體斷層切片影像，磁振造影檢查時不需侵入人體且對人體不具侵襲性，沒有輻射線傷害、且精準度高、檢查時間短、多方向掃描、提供三度空間影像，又有高對比的解析能力，因此，核磁共振已經是現代醫學不可或缺的診斷工具。現階段旋轉肌之磁振造影以 T2-Weight 影像序列，為觀察棘上肌的損傷之依據，磁振造影影像的雜訊較強，造成醫師診斷效果不佳。

醫學影像分析中，影像前處理的目的主要是影像的強化，使影像的各種特徵更清晰，以利醫療人員辨識或者交由電腦來分析，提高可讀性，協助醫師縮短診斷時間，而對比是其中非常重要的一個因素。因為對比與其它影響影像品質的因素息息相關。因為如此，對比增強成為影像處理中非常重要的一個部份，可以補強影像整體強化以更容易辨識影像，因而目前已被廣泛地應用與研究。

本研究中使用影像強化技術來增強影像品質，降低影像雜訊。直方圖等化(Histogram Equalization)為最常見的影像強化法，它利用影像中像素的強度分布，計算出轉換的函數，再利用此轉換函數將影像中像素的強度做重新分布。Nunes 和 Schiabel, (2001)利用灰階直方圖修整(Histogram Modification)，透過轉移函數轉換，重新調整像素點 $f(x, y)$ 的振幅比例，映射(mapping)至新的影像函數範圍內，經過直方圖轉換的影像偵測結果從 72% 提升至 90%。儘管直方圖等化在計算轉換函數時有著低複雜度的優點，但是同時也存在著一些缺點。因為直方圖等化只是單純的統計影像中之灰階分布狀況，因此在處理之後，改變像素分布機率，使影像對比性提高，但也易造成影像失真(Gonzalez and Woods, 1992; Jain, 1989; Zimmerman et al., 1988; Kim, 1997; Kim et al., 1998)。例如對一張亮度值分佈範圍很窄的影像運用直方圖等化，可能會造成大量的雜訊出現(Raji et al., 1998)。為了消除直方圖等化的缺點，Pei et al., (2006)提出了加權直方圖分離

(Weighted histogram separation, WHS)，WHS 的開發是為了增強圖像對比以消除直方圖等化的缺點，WHS 類似直方圖等化 (histogram equalization, HE)，但是，在演算的架構流程上兩者卻是截然不同，HE 主要目地是要將低強度對比的影像調整為高強度對比，而 WHS 則是能夠透過加權參數的彈性運用，以提高視覺質量陰暗的圖像，調整至使用者最滿意的程度。然而加權直方圖分離法只有一個控制參數：加權參數 w ，加權參數的大小會使影像在分離過程中，使得影像強度過度增加或減少的可能。因此本研採用修改 Zeng and Liao (2008)WHS 公式，以降低影像中塊狀效應，在本研究中稱為 coupled WHS。根據上述描述，本研究目的在於，(1) 評估不同影像強化方式 (ie., 直方圖等化、WHS 與 coupled WHS)，何種強化肩關節影像時失真率較低，以及(2)評估旋轉肌磁振影像經由影像對比強化處理後之診斷績效，是否有顯著提升醫療人員辨識能力，以期望能提升強化後的辨別度，以達成輔助醫師或學者快速得到所需資訊之目的。

2. 研究方法

2.1 研究資料

本研究使用台灣中部某醫院資料，從 2005 年 8 月至 2009 年 12 月期間，搜集了 60 位肩關節磁振照影影像，包括裂患者 24 位，斷裂 24 位與正常 24 位。利用 GE MR Signa Excite 1.5T 擷取 MR 影像，其中棘上肌斷裂患者皆經由外科手術確認。

2.2 研究理論

2.2.1 直方圖等化(Histogram Equalization)

一個影像的直方圖均等化代表灰階像素的個數除以總像素所形成的函數，可視為機率密度函數的一個估測。直方圖等化就是將灰階值平均分配給影像中的所有像素，使灰階值的直方圖盡可能呈現均勻分佈，以提高影像的對比 (如圖 1 所示)。假設影像的灰階值範圍為 $[0, L-1]$ ，第 k 個灰階值為 N_k 。 N 為影像中像素的總數，則直方圖為公式(1)，直方圖等化轉換影像為公式(2)。

$$f(k) = p\{I(i, j) = k\} = \frac{N_k}{N} \quad (1)$$

$$g_k = T(I_k) = \sum_{m=0}^k f(m) = \sum_{m=0}^k \frac{N_m}{N} \quad (2)$$

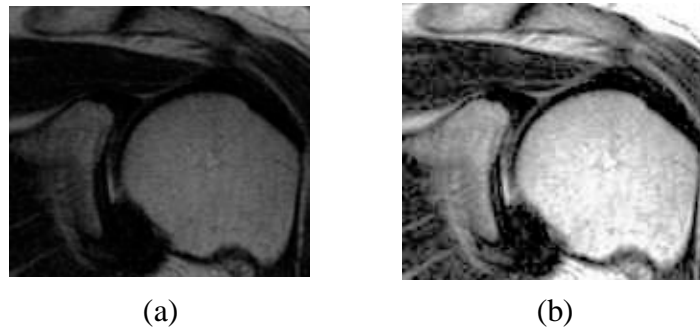


圖 1. 圖(a)為原始影像；圖(b)為直方圖等化轉換後影像

2.2.2 加權直方圖分離法(Weighted Histogram Separation, WHS)

加權直方圖分離法(Pei et al., 2006)主要是以等級制(hierarchical)的直方圖分離單元(Histogram Separation Unit, HSU)作為基礎，加以延伸(Nilsson et al., 2005a; Nilsson et al., 2005b)，如圖 2 所示。

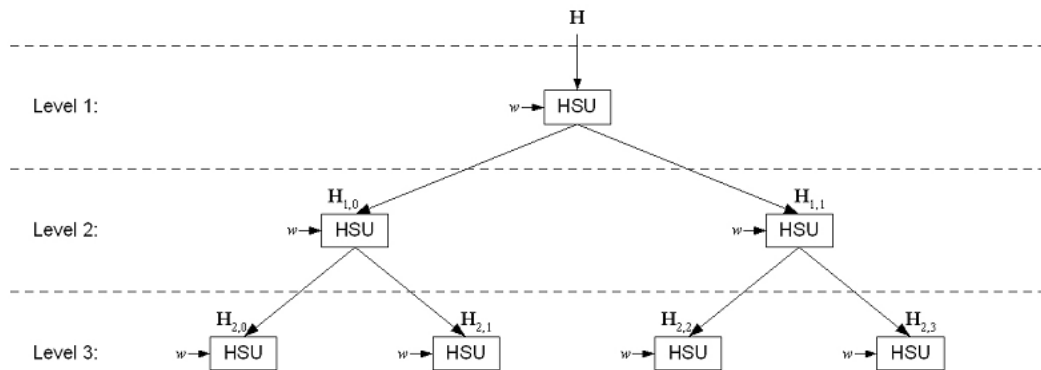


圖 2. WHS 演算圖示法 (Pei et al., 2006)

WHS 演算法是將一張欲強化影像，選擇適當門檻值區分為兩部份影像，而 WHS 演算法則分為三步驟。首先，進行門檻值的選擇：

$$\tau = \arg \min_{0 \leq \tau \leq H} \left| W - \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{\tau} H(p) \right| \quad (3)$$

其中 H 為直方圖的維度，即 $H=256$

$H(p)$ 為直方圖 H 第 p 段的值

W 為控制影像分離的加權向量參數

M 為整張影像的總像素個數

接著，根據方程式(3)所找出的門檻值，將影像一分為二，將小於等於 τ 的直方圖部份以 H_0 標註，而大於 τ 的直方圖則以 H_1 標註之。其定義如方程式(4)，(5)所示。

$$H_0(p) = \begin{cases} H(p), & \text{if } p \leq \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$H_1(p) = \begin{cases} H(p), & \text{if } p > \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

最後，將分離後的各段影像，依分離後屬性給予權重值，再進行影像結合，如公式(6)，產生一張新的強化影像(如圖 2 所示)。

$$H(p) = \left\{ \sum_{j=0}^{H-1} H_{L,i}(j) \mid p = \lfloor i \cdot \frac{H}{2^L} \rfloor, 0 \leq i \leq 2^L - 1 \right\} \quad (6)$$

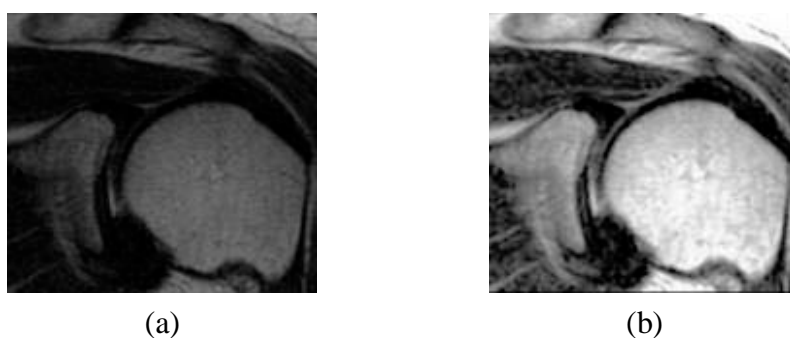


圖 3. 圖(a)為原始影像；圖(b)為加權直方圖等化(W=0.5)轉換後影像

在WHS中必須控制加權參數W，而加權參數值介於0~1之間(如圖4所示)，因此在本實驗找尋影像處理專門人員與骨科主治醫師挑選適合的權重值。本研究結果發現，醫師對於強化後的影像，挑選權重值皆落入0.4-0.6，其結果與過去文獻建議設定值相符(Pei et al., 2006)，建議WHS權重值為0.5。因此本研究將WHS權重值設定為0.5。

Original	(w=0.1)	(w=0.2)	(w=0.3)	(w=0.4)
(w=0.5)	(w=0.6)	(w=0.7)	(w=0.8)	(w=0.9)

圖 4. WHS 各加權值強化影像

2.2.3 耦合加權直方圖分離法(coupled WHS)

加權直方圖分離法只有一個控制參數：加權參數 w ，加權參數較小時，在影像分離過程中， H_0 的 pixel 會小於 H_1 ，意味著強化後的影像，會具有強度較高的效果。相反的，在影像分離過程中， H_0 的 pixel 會大於 H_1 ，意味著強化後的影像，會具有強度較低的效果。依照 Zeng and Liao (2008)研究指出，WHS 透過公式(7)之後處理，可以有效減少塊況效應，其中原圖乘亮度增強參數 α 。

$$L_F(i, j) = L_E(i, j) + \alpha \times L(i, j) \quad (7)$$

其中 $L(i, j)$ ， $L_E(i, j)$ 和 $L_F(i, j)$ 分別表示第 (i, j) 次方像素的原來亮度、增強與最後結合圖像。

然而 Zeng and Liao 在參數 α 裡並未依照原圖之最大灰階值作調整，因此本研究將其修改(如圖 3)，重新定義 α 如下：

$$\alpha = \frac{1}{\max(L)} \quad (8)$$

其中 $\max(L)$ 為原圖中最高的像素

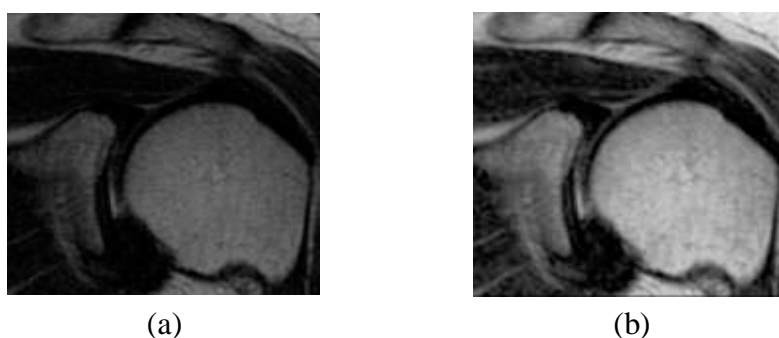


圖 5. 圖(a)為原始影像；圖(b)為 coupled WHS ($W=0.5$)轉換後影像

根據上述三類影像強化方法，如圖(1b)、(3b)、(5b)，本研究以影像失真率較低為衡量依據，本研究採用峰值雜訊比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 來作為評估工具。

2.3 影像品質評估

一般經由影像處理後的影像都會與原始影像上有差異，而為了衡量經過處理後的影像品質，通常會參照峰值雜訊比（Peak Signal to Noise Ratio, PSNR）的數據來認定使用的演算法結果是否令人滿意。而 PSNR 是一個表示信號最大可能功率和影響其精確度的破壞性噪聲功率的比值之客觀工程視訊評估方式，可將處理後的影像和原始影像進行比較並計算出差異值，當 PSNR 值越高就代表失真越少。

$$\text{MSE} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2 \quad (8)$$

其中 I 為原始影像

m 為影像的縱向大小

n 為影像的橫向大小

K 為經過影像處理後的影像

由於許多信號都具有非常寬的動態範圍，因此 PSNR 常用對數分貝單位來表示。其公式如下：

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\text{Max}_i^2}{\text{MSE}} \right) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{Max}_i}{\sqrt{\text{MSE}}} \right) \quad (9)$$

其中，Max_i 是表示影像灰階值的最大數值

如果每個像素點都用 8 位元表示，那麼最大值 Max_i = 2⁸ - 1 = 255。

2.3 分類評估方式

本研究採用 F-Measure 的評估方式以針對影像強化後分類結果好壞做評估。其中，F-Measure 包含了召回率(Recall)及精確度(Precision)，公式如下所示：

召回率 = $\frac{TP}{TP + FP}$ ，召回率是用來計算分類系統補捉到正確分類的百分比

精確度 = $\frac{TP}{TP + FN}$ ，精確度是用來計算分類系統預測正確的百分比

其中 TP:代表正確分類數，

FP:代表正確分到其他類別數，

FN:不正確分到本類的文件數。

若以 R：代表召回率、P：代表精確度，則 F-Measure 的公式為：

$F\text{-Measure} = \frac{2RP}{R + P}$ ，當召回率與精確度的值愈高時，其F-Measure 的值也愈高，這表示其影像分類的辨識品質也愈好。

2.4 研究流程

本研究流程如圖 6 所示，實驗共分為三階段，詳述如下：

階段一：將取得之肩關節磁振造影影像作為基礎影像，將三種情況(ie. 正常、撕裂傷、斷裂傷)影像，分別以直方圖等化、WHS 與 coupled WHS 三種影像強化法，來評估影像強化後品質，利用峰值雜訊比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 進行原始影像與強化影像之績效評估。

階段二：使用原始影像(未經過強化之影像)交由三位專家進行判斷，參予醫師與第一階段醫師不同，並運用 F-measure 評估正確率。

階段三：第三階段績效評估共有兩個部分，第一部分為評估正常組織與受傷組織的診斷差異。第二部分為評估受傷組織中，撕裂傷與斷裂傷的診斷差異。除原始影像外，再加入第二階段所求得之最佳影像，同時給予專家進行判斷，運用 F-measure 評估正確率，並比較診斷結果是否有差異。

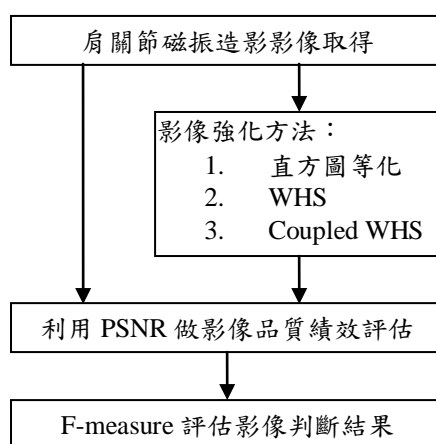


圖 6. 研究架構圖

3. 結果與討論

本研究運用直方圖等化、WHS與coupled WHS三種影像強化技術，評估並找出肩關節影像失真程度最低的強化方法，並利用PSNR來評估影像品質。由表1得知，在無受傷影像中，coupled WHS在PSNR影像失真程度評估中顯著較WHS

與HE佳[F(2,54)=58.555, $p<0.000$]。且在撕裂傷影像中，coupled WHS影像失真程度顯著較WHS與HE低[F(2,54)=35.601, $p<0.000$]。斷裂傷影像亦發現coupled WHS影像失真程度顯著較WHS與HE低[F(2,54)=7.099, $p<0.002$]。

由上述描述得知，無論是無受傷、撕裂傷與斷裂傷肩關節影像，結果皆顯示coupled WHS影像之PSNR影像失真品質顯著較低，由此得知，雖然HE與WHS強化後之影像品質效果已經具備相當不錯的結果，但本研究修改後之WHS更能得到較佳之影像視覺效果，使影像品質明顯提升，因此coupled WHS為一有效之影像強化方法。

表1. PSNR影像品質評估敘述統計表

		個數	平均數	標準差	95% 信賴區間		最小值	最大值
					下界	上界		
正常*	HE	20	11.665	1.938	10.881	12.450	15.231	9.846
	WHS	20	12.106	1.691	11.321	12.890	15.312	10.826
	Coupled WHS	20	17.354	1.641	16.503	18.205	20.578	16.250
撕裂傷*	HE	20	14.545	1.645	13.610	15.480	16.668	12.458
	WHS	20	14.585	1.623	13.650	15.520	16.847	12.599
	Coupled WHS	20	19.390	2.781	18.455	20.324	23.294	15.962
斷裂傷*	HE	20	16.410	3.925	14.660	18.161	20.803	11.433
	WHS	20	15.352	3.816	13.602	17.103	20.368	11.230
	Coupled WHS	20	19.809	3.983	18.059	21.560	24.743	15.936

*表示三種影像強化方法有顯著差異, $\alpha<0.05$

F-measure是結合precision和recall的綜合指標，依據實驗結果之數據來看(如表2,3)，利用精確度和召回率計算出代表整體的F-measure，原始影像(控制組)為50.6%，原始影像+coupled WHS強化影像(實驗組)為54.5%，顯示出影像評估過程中，加入強化後影像表現較佳，亦發現增加影像強化後影像在精確度(Precision)和召回率(Recall)方面比未加入影像強化影像的效果好，顯示出醫師判斷影像品質將有所提升。

Table 2. 三位主科主治醫師判斷結果

Classifier	原始影像預測值(控制組)			原圖+強化後影像預測值(實驗組)		
	無受傷	撕裂傷	斷裂傷	無受傷	撕裂傷	斷裂傷
無受傷	30	26	4	29	21	10
撕裂傷	10	29	21	6	34	20
斷裂傷	7	23	30	5	22	32

註 1：灰色部分為正確判斷

Table 3. 原始影像預測值與原圖+強化後影像預測值之績效評估

Classifier	Precision	Recall	F-measure
原始影像預測值	51.9%	49.5%	50.6%
原圖+強化後影像預測值	56.1%	53.1%	54.5%

整體而言，原始影像加上coupled WHS影像比原始影像有較高的預測率。因此醫生在影像判斷過程中，若能夠將使用強化後影像，就會獲得較佳的整體客觀的預測率。

4. 結論

本論文評估HE、WHS與coupled WHS三種不同影像強化方法，並利用PSNR進行績效評估，結果發現，WHS權重(W)等於0.5時有較佳的影像強化效果。實驗結果顯示，coupled WHS強化後影像之PSNR有較低之影像失真率。將結合原影像與調整後之WHS影像強化，並給予三位骨科主治醫師進行診斷判定，且利用F-measure來評估醫師診斷率。結果發現，原始影像診斷正確率為50.6%，結合原始影像及coupled WHS強化影像，正確率提升至54.5%。本研究提出一整合原影像及影像強化之架構，實驗結果顯示，本論文所提之架構對於提升輔助診斷醫學影像判讀績效，為一可行之機制。

目前醫師診斷方式主要還是依賴視覺判定，本研究之目的為提供醫師視覺化影像診斷工具。未來研究可透過特徵擷取與分類器，建構一個自動化分類系統電子診斷輔助系統，以期獲得分類績效更穩定之輔助診斷系統。

致謝

本研究部份經費承國科會(編號：NSC 99-2221-E-224 -034)補助，本文作者特此致謝。

參考文獻

1. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (1992). Digital image processing, Addison-Wesley, Reading, MA.
2. Jain, A.K. (1989). Fundamentals of digital image processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
3. Kim, T.K., Paik, J.K. and Kang, B.S. (1998). Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 44(1), pp.82-87.
4. Kim, Y.T. (1997). Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 43, no. 1, pp. 1-8.
5. Nilsson, M., Dahl, M. and Claesson, I. 2005a, The successive mean quantization transform. IEEE, International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. 4, pp.18-23.
6. Nilsson, M., Dahl, M. and Claesson, I. 2005b, Gray-scale image enhancement using the SMQT. IEEE, International Conference on Image Processing. Vol. 1, pp.11-14.
7. Nunes, F., Schiabel, H., Benatti, R., Stamato, R., Escarpinati, M., Gues, C., (2001). A method to contrast enhancement of digital dense breast images aimed to detect clustered microcalcifications” IEEE International Conference on Image Processing, v 1, pp. 305-308.
8. Pei, S.C., Zeng, Y.C. and Ding, J.J. (2006). Color images enhancement using weighted histogram separation,” ICIP, pp.2889-2892.
9. Raji, A., Thaibaoui, A., Petit, E., Bunel, P. and Mimoun, G. (1998). “A gray-level transformation-based method for image enhancement” Pattern Recognition Letters, v 19, n 13, Nov, pp. 1207-1212
10. Zeng, Y.C. and Liao, H.Y. (2008). Video enhancement based on saturation and contrast enhancement. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp.3550-3553.
11. Zimmerman, J., Pizer, S., Staab, E., Perry, E., McCartney, W., and Brenton, B. (1988). Evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement. IEEE Trans. Medical Imaging, vol. 7, no. 4, pp. 304-312.

Computer Aided Diagnosis of Rotator Cuff Injury in Shoulder Magnetic Resonance Imaging

Ou^{a*}, Y.K. Lin^{a,b}, C.C., Wang^a, C.N., Pai, P.F., Fu^a, J.C.

^aDepartment of Industrial Engineering and Management, National Yunlin University of Science and Technology

^bDepartment of Orthopedics, National Taiwan University Hospital Yun-Lin Branch

^cDepartment of Information Management, National Chi Nan University

Abstract

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is the most commonly used tool to diagnose supraspinatus muscle rupture or tear. However, it is a difficult task to discriminate the features between the rupture and the tear in MR images, which leads to low diagnostic accuracy. In this paper, image enhancement techniques are employed to improve diagnostic performance. Three types of histogram-based image enhancement techniques applied to rotator cuff MR images are under test: 1) histogram equalization (HE), 2) weighted histogram separation (WHS), and 3) coupled weighted histogram separation (coupled WHS). The Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) was used to measure the distortion of the enhanced images. The experimental group consist the raw MR images and the enhanced images with the highest PSNR. Both the control group and experimental group were randomly presented to three orthopedic physicians for performance evaluation. The accuracy rate and F-measure were applied to measure the diagnostic performance. Experimental results showed the raw MR image combined with the coupled WHS images outperforms the raw MR images both in accuracy rate and F-measure. A coupled WHS image enhancement technique was developed to classify rotator cuff MR imaging by type. The proposed enhancement techniques improve the diagnostic performance of classifying the injury by type.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging, Image Enhancement, Coupled Weighted Histogram Separation, Rotator Cuff