بسم الله الرحمن الرحيم

٧٣٤٥٤

دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

موضوع:

جداسازی بافتهای استخوانی از تصاویر CT سه بعدی

۱۳۸۲ /۱/ ۱۵

نگارنده :

سید بهرام برقعی

استاد راهنما :

دکتر رضا آقائی زاده ظروفی

استاد مشاور:

دکتر حمید سلطانیان زاده

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق- گرایش مهندسی پزشکی

۵۵۶۴۷

مهرماه ۱۳۸۱

موضوع:

جداسازی بافتهای استخوانی در تصاویر CT سه بعدی

نگارنده : سید بهرام برقعی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق – گرایش مهندسی پزشکی

از این پایان نامه در تاریخ ۸۱/۷/۱۵ در مقابل هیات داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی: دکتر سید محمد علی بنی هاشم

مدیر گروه آموزشی: دکتر محمود کمره ای

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه : دکتر جواد فیض

استاد راهنما : دکتر رضا آقایی زاده ظروفی

استاد مشاور : دکتر حمید سلطانیان زاده

عضو هیات داوران : دکتر کارولوکس

عضو هیات داوران : دکتر کمال الدین ستاره دان

عضو هیات داوران : دکتر محمد باقر شمس اللهٔ

چکیده

جداسازی بافتهای استخوانی امروزه بسیار مورد توجه متخصصان ارتوپد، جراحان مفاصل استخوانی و بافتهای مجاور و حتی دندانپزشکان می باشد. آستانه بندی معمولی یک روش بسیار معمول و سریع برای جداسازی این بافتها از تصاویر CT می باشد. به دلیل وجود مشکلات در این روش غیر اتوماتیک، آستانه بندی وفقی به عنوان جایگزین آن مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق پس از تحلیل آستانه بندی معمولی دو روش آستانه بندی وفقی یکی بر پایه تانسورها و اطلاعات گرادیان محلی و دیگری براساس شبکه عصبی PCNN دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته اند. روش بر پایه شبکه عصبی به صورت اتوماتیک برای استفاده در این کاربرد تطبیق داده شده است. سپس به منظور رفع مشکلات هر کدام و همچنین جمع امتیازات آنها، شبکه عصبی PCNN با استفاده از اطلاعات گرادیان به صورت سه بعدی توسعه داده شده روشی به منظور جداسازی بافتهای استخوانی ارائه شده است. به دلیل وسعت کاربرد جداسازی استخوانهای لگن و ران در میان سایر کاربردها تصاویر CT این استخوانها به عنوان داده ها در نظر گرفته شده اند. سپس در این تصاویر با اعمال هر روش به صورت جداگانه بافتهای استخوانی از میان سایر بافتها استخراج شده و خروجی هر روش با تصاویر استخراج شده بر اساس نظر متخصص مقایسه شده است. روش پیشنهادی در میزان استخراج نواحی استخوانی و نواحی مرزی استخوانی در مقایسه با سایر روشها موفق نشان داد. در ادامه به منظور استخراج کامل نواحی استخوانی و همچنین جداسازی بافتهای استخوانی از یکدیگز، روشهای تکمیل مرز نظیر مدلهای تغییر شکل پذیر مورد بررسی قرارگرفت که در نهایت روشی اتوماتیک برای جداسازی استخوان لگن از استخوان ران ارائه شده است. پس از تطبیق نتایج استخراج شده توسط این روش با تصاویر استخراج شده بر اساس نظر متخصص، این روش نسبتا موفق ارزیابی شد هر چند که در ادامه استفاده از الگوریتمهای بهینه سازی مفید به نظر می رسد.

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه ۳

۱-۱ اهمیت و کاربرد جداسازی بافتهای استخوانی ۳

۱-۲ روشهای جداسازی بافتهای استخوانی ۷

۱-۳ روش پیشنهادی ۱۵

۱-٤ جداسازی استخوانها از یکدیگر ۱۷

۱-۵ جمع بندی ۱۸

فصل دوم: آستانه بندی معمولی ۱۹

۲-۱ پیش پردازش ۲۰

۲-۲ فقدان یک آستانه مشخص ۲۲

۲-۳ حجم بندی جزیی ۲۵

۲-٤ تفاوت ماهیت بافت استخوانی ۲۸

۲-۵ پردازش وفقی ۲۹

فصل سوم :آستانه بندی وفقی ۳۱

۳-۱-آستانه بندی وفقی با استفاده از تانسور ۳۲

۳-۱-۲ توصیف هندسی ۳٤

۳-۱-۳ تشکیل تانسور جهت بندی ۳۷

۳-۱-٤ استخراج ویژگی و سنتز فیلتر ۳۸

۳-۱-۵ تخمین جهت بندی ٤۲

۳-۱-٦ فیلترهای کوددراتیک در فضای سه بعدی ٤٤

۳-۱- ۷ فیلتر وفقی کنترل شونده با تانسور ٤۵

۳-۲ شبکه عصبی PCN ۵۲

۳-۲-۱ شبکه عصبی اکهورن ۵۳

۳-۲-۲ PCNN برای کاربردهای پردازش تصویر ۵٦

۳-۲-۳ کاربرد PCNN به عنوان آستانه بندی وفقی ٦۲

۳-۲-٤ نحوه عملکرد شبکه PCN ٦٤

۳-۲-۵ کاربرد در جداسازی بافتهای استخوانی ٦۵

فصل چهارم : روش پیشنهادی: شبکه PCNN توسعه یافته ٦٦

٤-۱ - پردازش سه بعدی ٦۷

٤-۲ گرادیان سه بعدی ٦۸

٤-۳ دو مرحله‌ای کردن عملیات ۷۵

٤-٣- ١ پارامتر τ_L ٧٥
٤-٣- ٢ پارامتر τ_T ٧٦
٤-٣- ٣ پارامتر V_L ٧٧
٤-٣-٥ پارامتر β و پارامتر پنهان p ٧٨
٤- ٤ و ٤-٥ امکان دخالت ناظر و شرط خروج ٧٩
٤-٦ الگوریتم نهایی ٨٢
فصل پنجم:جداسازی بافتهای استخوانی از یکدیگر و تکمیل مرزها ٨٥
٥-١ مدلهای تغییر شکل‌پذیر ٨٦
٥-١-٢ مدلهای مار یا مدلهای تغییر شکل‌پذیر ٨٨
٥-١-٢-١ توابع انرژی ٨٨
٥-١-٢-٢ عناصر تابع انرژی ٨٩
٥-١-٣ الگوریتم بکار گرفته شده ٩٠
٥-٣ روش پیشنهادی ٩١
فصل ششم: نتایج ٩٧
٦-١- روشهای جداسازی بافتهای استخوانی از غیر استخوانی ٩٧
٦-١-١ آستانه بندی معمولی ٩٩
٦-١-٢ آستانه بندی وفقی تانسوری ١٠٠
٦-١-٣ PCNN معمولی ١٠٣
٦-١-٤ روش پیشنهادی : PCNN سه بعدی توسعه یافته ١٠٤
٦-١-٥ مقایسه نتایج ١٠٦
٦-١-٥-١-بررسی روش آستانه بندی معمولی ١٠٨
٦-١-٥-٢- بررسی آستانه بندی وفقی تانسوری ١٠٩
٦-١-٥-٣- بررسی روش PCNN معمولی ١١١
٦-١-٥-٤- بررسی روش پیشنهادی ١١٢
٦-١-٦-مقایسه ١١٨
٦-٢- نتایج جداسازی بافتهای استخوانی از یکدیگر و تکمیل مرزها ١٢٢
٦-٢-١ الگویتم مار کلاسیک ١٢٢
٦-٢-٢ الگوریتم پیشنهادی ١٢٤
٦-٢-٣ مقایسه ١٢٦
فصل هفتم : نتیجه گیری ١٢٨
ضمائم و فهرست مراجع ١٣٣

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اهمیت و کاربرد جداسازی بافتهای استخوانی

جداسازی بافتهای استخوانی در تصاویر پزشکی امروز بسیار مورد توجه متخصصان می‌باشد. اندازه‌گیری حجم و ابعاد بافت‌ها به منظور بررسی بیماریها یا بی نظمی‌های ساختاری نظیر جابجایی زانو[۱] ، نمایش و نگاشت بافت‌ها [۲] و [۳] ابزارهایی است که می‌تواند متخصصان را در تراپی ها و تشخیص بیماریها یاری دهد.

یکی از معمولی‌ترین این موارد جراحی‌های سر وگردن نظیر جراحی اندوسکوپیک سینوس می‌باشد[۱]. نمایش سه بعدی[۱] تصاویر بافتها، توانایی‌های جراح را با فراهم آوردن راهنمایی دقیق فضایی بالا می‌برد که شناسایی نواحی استخوانی یکی از لوازم این کار می باشد. جراحی جمجه[۲]

---

[۱] Render
[۲] Carniofacial

[٤] به منظور اصلاح آسیبهای حاصل از ضربه و یا معلولیتهای مادر زادی نیز.دیگر کاربرد این جداسازی می باشد. در این جراحی شخص جراح قسمتهای نرم جمجه را از هم جدا کرده دوباره آنها را می‌چیند تا به یک فرم مناسب دندان و حالت صورت دست پیدا کند. این جراحی بایستی کاملاً از پیش طراحی شود تا دقیقاً حالت جمجه و بافتهای نرم را پس از عمل قابل پیش بینی کند.

همچنین تشخیص موارد پاتو آناتومیک[1] در نواحی با مفاصل کوچک مانند مچ و یا ستون فقرات با استفاده از تصاویر پزشکی مخصوصاً تصویر برداری‌های برشی نظیر CT,MRI بسیار آسانتر خواهد شد. تصاویر جدا شده بافتها نظیر استخوانهای درشت نی[2] و مچ[3] می‌تواند بررسی نحوهٔ حرکت دراین مفاصل را بسیار آسان می سازد[٥] و [٦] . کاربرد دیگر جدا سازی استخوانهادر دندانپزشکی مخصوصاً Oral Implant می‌باشد که جراحان و متخصصان پروتز .همچنین آزمایشگاههای دندانپزشکی علاقمندی بسیاری برای این امرنشان می‌دهند[٧] .

اما اندوپروتزیس[4] به منظور کارگذاری مفاصل ران یکی از معمولی‌ترین بررسی‌های ارتوپدی می‌باشد که هر ساله تقریباً ٢ میلیون نفر در سراسر جهان به خاطر بیماری مفاصل ران تحت عمل جراحی قرار می‌گیرند[٨] که این حجم از تقاضا اهمیت جداسازی استخوانها از یکدیگر را نشان می دهد.

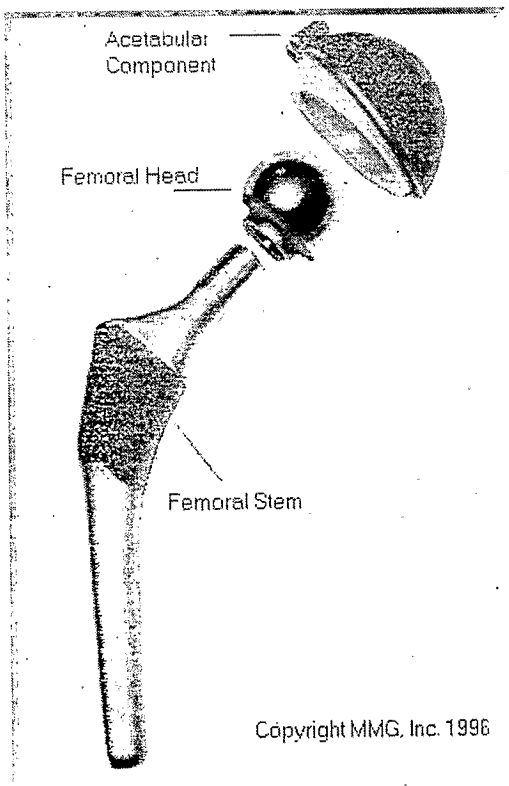
پوسیدگی استخوان یکی از رایج‌ترین بیماریها مخصوصاً در بین خانمها می‌باشد. یکی از حساس‌ترین نواحی ای که پوسیدگی باعث از بین رفتن کارآیی آنها می‌شود، ناحیهٔ سر استخوان ران[5] می‌باشد که بسیاری از جایگزینی‌های مفاصل مصنوعی را به خود اختصاص می‌دهد. برای انجام این عمل جراحی ابتدا از پای شخص تصویر برداری صورت می‌گیرد آنگاه استخوانهای لگن و ران از یکدیگر جدا شده، سپس توسط متخصص ارتوپد ناحیهٔ سر استخوان ران و شکل سه بعدی سر

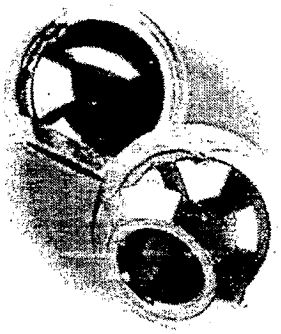
---

١ Patho Anatomic
٢ Tibia
٣ Carpal
٤ Endoprothesis
٥ Femoral Head

استخوان معلوم می‌شود و سپس این شکل به دستگاه CNC[1] داده می‌شود تا یک بافت مصنوعی ساخته شود. آنگاه به کمک اضافه کردن یک قطعه میله مانند به این بافت مصنوعی آنرا در داخل استخوان لگن قرارمی دهند (شکل ۱-۱).

در تمام مواردی که در بالا به عنوان استفادهٔ جداسازی بافتهای استخوانی ذکر شد، خوداستخوانها مورد نظر بودند. یعنی همواره می‌خواستیم تا استخوانها را در مقابل سایر بافتها متمایز سازیم و سپس آنها را مورد بررسی قرار دهیم. اما در دسته‌ای دیگر از کاربردها، جداسازی استخوان به منظور بررسی بافتهای غیر استخوانی انجام میگیرد. به این معنی که در اصل بافتهای غیر استخوانی مورد نظر هستند اما چون بافتهای استخوانی مانع دیده شدن بافتهای دیگر می شود لازم است تا از تصویر جدا شود. به





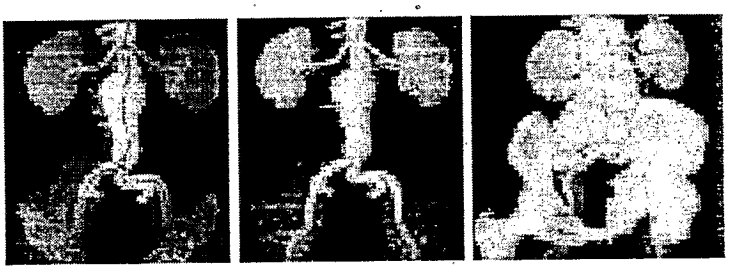
(ب) (الف)

شکل ۱-۱-بافتهای استخوانی مصنوعی الف) سر استخوان ران که به صورت مصنوعی ساخته شده است .ب) بخشهای مختلف استخوان ران

[1] Computer Numerical Controls

طور خلاصه در جداسازی بافت استخوانی گاه خود استخوان مورد نظر است و گاه تصویر باقیمانده. به طور مثال برای یک متخصص، رگهای خونی بعضا درتصاویر رادیولوژی قابل مشاهده نیست[۹]. در چنین مواقعی برداشتن ناحیهٔ کورتیکال[۱] استخوانی (نواحی که دارای شدت روشنایی زیادی‌درتصاویر CT می‌باشند) می‌تواند عملیات تشخیص رادیولوژیکی را تسریع کند.بدین ترتیب که مشاهدهٔ بلاک‌های آهکی شده و نرم و همچنین باریک شدن رگها را بسیار آسانتر می‌کند.

از آنجا که روش معمول آنژیوگرافی برای تشخیص وضعیت رگها با ریسک همراه است، بنابراین روشهای غیرتهاجمی مانند CT مورد علاقه رادیولوژیست‌ها می‌باشد تا سیستم عروقی را ارزیابی کنند .از آنجا که تصاویر CT معروف به ایجاد کانتراست میان بافتهای استخوانی و بافتهای نرم‌می‌باشد این کانتراست می تواند در جداسازی استخوانها در این تصاویر کمک شایانی بنماید(شکل ۲-۱).



(الف) (ب) (ج)

شکل۲-۱- جداسازی استخوان به منظور مشاهده رگهای خونی (الف) تصویر تداخل یافته عروق و بافتهای استخوانی که عروق در آن متمایز شده است.(ب) تصویر عروق به تنهایی (ج) تصویر واقعی عروق

در میان تصاویر پزشکی، تصاویر CT به این علت که استخوانهادارای شدت روشنایی بالایی نسبت به سایر بافتها می‌باشند اکثراً برای جدا سازی بافت‌های استخوانی مورداستفاده قرار می‌گیرد. [۱۳و۱۲و۱۱و۱۰] . در شکل ۳-۱ مقایسه‌ای میان تصاویر CT و MRI انجام گرفته است . همانطور که مشاهده می‌شود تمرکز بافتهای استخوانی در روشنایی بالاتر در تصاویر CT بسیار بارزتر است.

---

[۱] Cortical

در جریان جراحی‌های رایج نظیر THA[1] و PO[2] بیشتر سیستمها از یک اطلاعات تصویر CT به همراه یک سنسور مکان یابی خاص استفاده می‌کنند. این نوع از جراحی‌های به کمک تصویر از سه مرحله تشکیل شده‌اند [١٤] :

الف- ساختن یک مدل نرم‌افزاری از شیء تحت عمل جراحی از تصاویرگرفته شده قبل از عمل.

ب- تطبیق[3] مدل نرم‌افزاری با شیء حقیقی

ج- ردیابی و اندازه‌گیری شیء و ابزار آلات جراحی در حین عمل

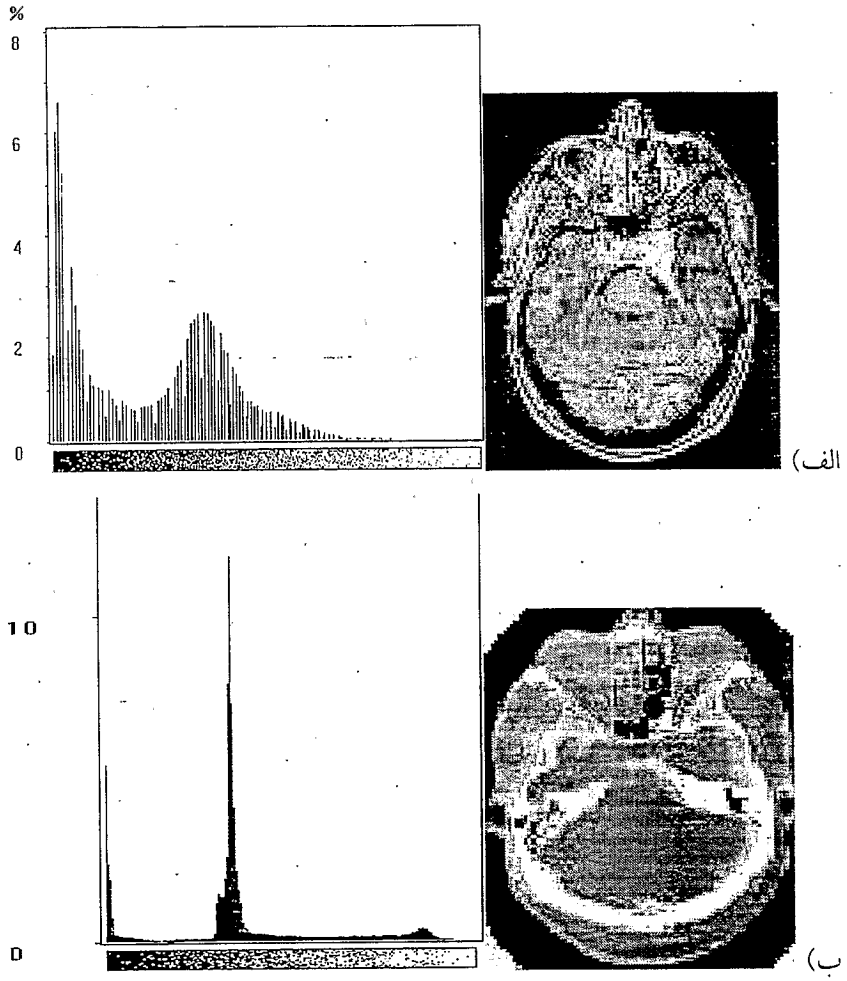
دقت تطبیق بر دقت کلی عمل تاثیرمی گذارد و کیفیت تطبیق هم به کیفیت تصویرهای قبل از عمل جراحی بستگی مستقیم دارد. هر چه که این تصاویر بهتراستخراج شده باشند به صحیح ترانجام گرفتن عمل جراحی بیشترکمک می‌کنند.

٢-١ روشهای جداسازی بافتهای استخوانی

بیشتر سیستم‌ها از یک آستانه بندی[4] معمولی برای جدا سازی استخوانها در این تصاویراستفاده می‌کند. اما اصولاً یک سطح آستانه استاندارد وجود ندارد [١٤] چراکه چگالی CT یک عدد ثابت نیست به علاوه فاکتورهایی نظیر نوع ماشین CT ، پارامترهای تصویرگری[5] الگوریتم‌های بازسازی و همچنین عوامل ناشی از خود بیمار مانند اندازه، وجود بیماری و یا فلزهای کارگذاشته در استخوانها همه و همه باعث این خواهند شد که نتوان یک سطح آستانه استاندارد برای استخوانهاتعیین کرد.

---

١ Total Hip Surgery
٢ Pelvic Osteotomy
٣ Registration
٤ Threshold
٥ Scanning



شکل۳-۱- مقایسه کانتراست **MRI** و **CT** (الف) تصویر **MR** از یک مقطع به همراه هیستوگرا م (ب) تصویر **CT** از یک مقطع به همراه هیستوگرا م. تفاوت کانتراست بین این دو تصویر از روی مقایسه هیستوگرامهای آن دو واضح است.

از مهمترین عواملی که در شدت روشنایی بافتهای استخوانی تاثیر می‌گذارد اثر حجم بندی جزئی[۱] می‌باشد. همانطور که می‌دانیم تصاویر CT سه بعدی از واحدهای حجمی تشکیل شده‌اند که اصطلاحاً به آنها واکسل[۱] گفته می‌شود. این واکسل‌ها بعضا ۳ میلی متر ارتفاع دارند[۱۵].

---

۱ Partial Voluming

از اطلاعات و آرشیو علمی ایران

از آنجا که در استخراج تصویر از اطلاعات تصویر برداری برای تعیین شدت روشنایی یک واکسل یک میانگین گرفته می‌شود یعنی روشنایی تشخیص داده شده به هر واکسل به نسبت حجم‌اشغال شده توسط ساختار به حجم خود واکسل می‌باشد، بنابراین استخوانهایی با ساختار ریز (نسبت به ابعاد واکسل) دارای شدت روشنایی کمتری نسبت به مقدار واقعی خواهند شد و علاوه بر این حفره‌های ریز نیز امکان پرشدن خواهند داشت.

این امر باعث می‌شود که در مفاصل یعنی جایی که تنها غضروف حد فاصل استخوانها را از هم تشکیل می‌دهد و استخوانهابسیار به یکدیگر نزدیک هستند. پس از اعمال آستانه به یکدیگر بچسبند و بنابراین کار جداسازی استخوانها را از هم بسیار مشکل می‌کند.

همانطور که گفته شد عوامل بالا باعث می‌شوند تا نتوان یک سطح آستانه استاندارد برای استفاده در تمام برشهای CT معرفی کرد. لذا توسعه الگوریتمهای اتوماتیک جداسازی استخوانها به عنوان کار تحقیقاتی و علمی مورد توجه است. در بسیاری از موارد متخصصین ارتوپد خود تک تک برشها را به طور جداگانه تحت پردازش قرار می‌دهند و برای هر برش سطح آستانه مناسب رابرای جداسازی بافتهای استخوانی تعیین می کنند.

لازم به تذکر است که امکان مشخص کردن یک بازه به عنوان محتمل ترین ناحیه حضور بافتهای استخوانی نسبت به مشخص کردن یک سطح آستانه خاص آسانتر می باشد .

اما مساله دیگر در کارایی خود روشهای مبتنی بر آستانه بندی معمولی است. نکتهٔ قابل توجه دراین مسأله آن است که اصولاً با فرض نبود بیماری و عوامل محیطی و اندازه‌گیری، ماهیت بافتهای استخوانی یکسان نیست. بافتهای استخوانی همگی از یک ناحیهٔ کورتیکال و یک ناحیه اسفنجی[۲] تشکیل شده‌اند. نواحی کورتیکال دارای شدت روشنایی بسیار بیشتری نسبت به نواحی اسفنجی می‌باشند. (شکل ۱-٤) و مساله پیچیده‌تر آنکه نواحی اسفنجی و بعضاً برخی قسمتهای ناحیه کورتیکال دارای شدت روشنایی مشابه شدت روشنایی نقاط غیر استخوانی می‌باشند و بنابراین با هر

---

[۱] Voxel
[۲] Spongy

گونه اعمال آستانه یا هردو استخراج می‌شوند (هم نقاط استخوانی و هم نقاط غیر استخوانی) یا آنکه هر دو حذف می‌شوند. و این از اساس استفاده از آستانه بندی را زیر سوال می‌برد.

به طور خلاصه آستانه بندی معمول دارای مشکلات ذیل می‌باشد:

الف) نبودن یک سطح آستانه مشخص برای به کارگیری در کلیه برشها و تصاویر استخوانها

ب) تولید خطای حتمی در تعیین سطح آستانه بدون دخالت ناظر

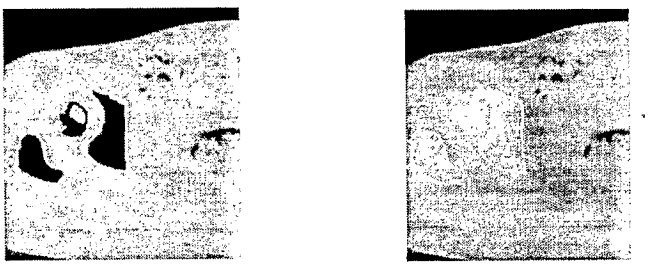
ج) ناپیوستگی شدت روشنایی در نواحی استخوانی بدلیل حجم بندی جزئی و مشکلات ناشی از حذف برخی ساختارهای ریز و پرشدن حفره‌ها و چسبیدگی استخوانها .

د) وجود بیماری مانند از بین رفتن ماده بین مفصل و یا کارگذاری فلز دراستخوان

هـ) تفاوت ماهیت استخوانی در نواحی کورتیکال و اسفنجی

و) یکسان بودن روشنایی برخی بافتهای استخوانی و غیر استخوانی.

اما با تمام این مشکلات نمی‌توان از مزایای آستانه بندی به راحتی گذشت. این روش، بسیار روش آسان و سریعی است و آنقدر محاسبات ریاضی ساده‌ای دارد که حتی متخصصان پزشک هم به راحتی آن را حس می‌کنند و برای آنها روشی بسیار ملموس می‌باشد. سرعت عاملی دیگر است که برای متخصصان بسیار حائز اهمیت می‌باشد الگوریتمی که برای محاسبه یک روز زمان میبرد خود بخود در متخصصان یک اینرسی برای به کارگیری ایجاد می‌کند



(ب) (الف)

شکل ٤-١- ناحیه اسفنجی (الف) یک برش از تصاویر CT .لگن و ران (ب) ناحیه اسفنجی در آن تیره شده است. تفاوت بازه روشنایی میان ناحیه کورتیکال و اسفنجی کاملا قابل تشخیص است.

بنابراین بایستی به آستانه بندی معمولی نگاهی دقیق‌تر کرد. اگر یکبار دیگر اشکالات وارد شده بر روش آستانه بندی معمولی را مرور کنیم می‌بینیم که آستانه بندی در برخی نقاط و نه در تمام آنها خطا دارد. بدین معنی که به طور مثال حجم بندی جزئی تنها در نقاط دارای روشنایی مشترک با نقاط غیر استخوانی داریم، اما در بیشتر نقاط نواحی کورتیکال روش آستانه بندی در صورت انتخاب آستانه‌ای مناسب توسط متخصص پاسخ مناسبی خواهیم داشت. پس به طور خلاصه مشکلات آستانه بندی معمولی را می‌توان به دو دسته اساسی تقسیم کرد:

الف- نمی‌توان یک سطح آستانه برای بکارگیری در تمام برشها پیدا کرد.

ب- عملکرد این روش در نقاط مختلف متفاوت است.

اگر فرض کنیم که متخصص می‌تواند برای انتخاب سطح آستانه وقت صرف کند و فعلاً از اتوماتیک کردن روش، چشم بپوشیم راه حل اشکال دوم بسیار ساده است.

«**بایستی در نقاط مختلف، متفاوت عمل کنیم**» و این یعنی پردازش ما به جای یک پردازش برای تمام نقاط، به پردازشی متفاوت در نقاط متفاوت تبدیل شود که اصطلاحاً به این نوع پردازش «پردازش وفقی[1]» گفته می‌شود.

در این تحقیق ما دو روش عمده پردازش وفقی مورد استفاده در استخراج بافتهای استخوانی از بافتهای غیر استخوانی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

دراولین روش [۱۶] با استفاده از تانسور ابتدا در هر نقطه خصوصیات محلی آن استخراج می‌شود. بدین ترتیب که در هر نقطه یک ماتریس ۳×۳ استخراج شده که همان تانسور مربوطه می‌باشد سپس ساختار محلی بر حسب جهت بندی غالب و همگن بودن محلی توصیف می‌شود. توصیف ساختاری براساس سه پایه فضایی می‌باشد: خط، صفحه و ایزوتروپیک. یعنی در هر نقطه تعیین می‌شود ساختار محلی آن چقدر به خط، صفحه و یا به بی جهتی و ایزوتروپیک بودن نزدیک است. سپس یک فیلتر متناسب با این ساختار طراحی می‌شود. که یک جزء پایین گذر و یک جز بالا گذر دارد.جزء بالا گذر این فیلتر به ساختار محلی حساس‌تر است و در نهایت به طور خلاصه اگر

---

[1] Adaptive Process