画像処理支援による大腿骨頭の骨梁解析と骨強度の推定*

多田 幸生^{*1}, 稗 方 孝 之^{*2}Trabeculae Analysis of Femoral Head by Image Processing
and Estimation of Bone Strength

Yukio TADA and Takashi HIEKATA

This study aims to develop an image processing system for the estimation of trabecular strength and to investigate the relationship between the loads and the trabeculae in the femoral head. The trabecular system is a useful source of knowledge for the mechanical environment of bone which is important in using orthopedic treatment. In this paper, the distribution of principal stress obtained by the finite-element model based on Pauwels' theory is compared with that of trabecular strength estimated using the image processing technique. It is found that the result of finite-element method is similar to the configuration of trabeculae in both magnitude and direction. This result shows that unknown applied loads to bone may be estimated using the inverse finite-element method.

Key Words: Biomechanics, Femoral Head, Trabeculae, Image Processing, Finite-Element Method, Principal Stress, Computer-Aided Analysis, Inverse Problem

1. 緒言

整形外科では、骨格の形状が病的である場合の治療法として、骨切り術等の外科手術が盛んに行われている。骨周囲の力学的環境を客観的、定量的に知ることは、骨の疾患の解明や治療に非常に有効である⁽¹⁾。人間の歩行機能で特に重要な役割を果たしている大腿骨骨頭部においてバイオメカニクスの分野ではPauwelsに代表されるように股関節周囲の力学的環境についての研究が数多く報告⁽²⁾されている。これらの研究で報告されている荷重の多くは平衡理論に基づいて算出されている。平衡理論に基づく股関節合力算定の問題点は、外転筋群の筋力およびその方向を決定することが困難なことおよび前額面の一平面に限られていたことである⁽³⁾。

一方、古くから骨の形態は、作用する荷重に対して最適なものに構築されていると考えられており、その内部構造である骨梁の形状も骨に作用する荷重と深い関係があると言われている⁽¹⁾。そこで、我々は骨梁の情報から荷重を推定することを提案する。具体的な方法としては、骨画像から骨梁の情報を画像処理手法を用いて定量的に取得し、それらの情報から骨強度を評価して、これらと骨形状の情報から、この構造がどのような荷重に対して最適であるのかを有限要素逆問題を解くことにより、荷重を推定するという手法である。本研究はこの第一段階として骨梁解析のための画像処理ソフトウェアの開発を行い、大腿骨頭の前額面、矢状面におけるスライス画像から画像上の小領域ごとに骨強度を評価する。また、これらとFEMによる応力解析の結果を比較して荷重との関係を考察する。

2. 骨梁

骨梁とは網状組織とも呼ばれ、骨の内部に存在するセミマイクロ構造である海綿骨の小柱のことを示し、そのパターンはある規則性をもって骨内部に張りめぐらされている。図1に大腿骨骨梁の1例を示す。これは大腿骨頭部を約5mmの厚さにスライスしてX線撮影したものであるが、あるパターンをもって張りめぐらされている骨梁の形状が鮮明に映し出されている⁽¹⁾⁽⁴⁾。

3. 画像処理システム

3.1 骨梁の解析法 本論文では、大腿骨頭の図2のような前額面(XY平面)、矢状面(YZ平面)の2平面について骨梁解析を行う。画像処理による解析を行うため、大腿骨頭を各解析面において約5mmの厚さにスライスした後にレントゲン撮影したものを用いる。解析領域は、骨格を含まない領域に限定するものとする。

* 平成4年7月23日 第4回バイオエンジニアリング部門学術講演会において講演、原稿受付 平成4年9月7日。

*1 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

*2 学生員、神戸大学大学院。

図1 大腿骨骨梁

図2 骨梁の解析法

図3 画像処理システム

3・2 機器構成 画像入力装置として三谷商事／ケイオー電子工業社製IFM/PC(IMM-256V8)を用いる。これは分解能256×256ドット、濃淡256階調であり、この画像メモリを4枚(フレーム1～4)装備している⁽⁵⁾。画像処理はNEC社製PC-9801RA、処理結果の出力は三菱電機社製モノクロビデオモニターNV-0930Z及びビデオコピープロセッサSCT-P61、NEC社製カラーディスプレイPC-TV453Nを用いる。図3にシステム構成を示す。

3・3 画像処理手法 本研究で開発したソフトウェアでは、指標として密度、濃度、走行方向の3つを設定し⁽⁶⁾、

図4 画像処理手順

図5 尾根部検出

これらをもとに様々な骨梁情報を得ることができる。その処理手順(図4)と得られる情報について以下に示す。

(1) 画像入力

骨のレントゲン像をカメラより取り込む。

(2) 前処理

一般に、観測された画像には多種多様な雑音が含まれている。よって画像に平均化法による平滑化処理を施し⁽⁷⁾、雑音を除去する。この画像をフレーム1に割り当て保存しておく。

(3) 尾根部検出

(2)の処理後の濃淡画像において、骨梁の存在を明確にするための処理として尾根処理と呼ばれる処理を行う。これは骨梁を画素濃度の山の尾根部と考えるとそれを検出し、2値化することにより骨梁線を抽出する操作である。図5に示すように注目画素の濃度値 $f(i,j)$ とそのまわりの8-近傍連結点の濃度値とを比較し、 f がその8方向の点の全ての濃度値よりも高いか同じであれば、その点を骨梁の尾根部と見なし濃度値を255にし、そうでなければ0として2値化する。ここで得られた画像を尾根画像と呼ぶことにする。この画像をフレーム2に割当保存しておく。

(4) 2値画像前処理

骨梁の方向の情報を得るために、尾根画像から骨梁の分

図6 解析領域の分割

割処理を行う。つまり尾根画像を細線化、交点除去、孤立点除去を行う。この処理によって骨梁が画像上で交点を持たない線画像の集合として表される。ここで得られた画像を分割画像と呼ぶことにする。この画像をフレーム3に割り当て保存しておく。

(5) 領域設定

解析する領域を画像上の座標値を入力する形式で設定する。また、図6のようにその解析領域を画像上で10×10画素の正方形小領域に分割する。

(6) 骨梁解析

小領域ごとに画像解析を行い、特徴量を得る。

(7) 結果出力

得られた骨梁の様々な数値データとしての特徴量を視覚的に分かりやすいグラフィックで表現する。

3.4 特徴量

特徴量として以下のようなものがある。
 •濃度：フレーム1に保存されている濃淡画像において、小領域内での画素濃度値の平均を“濃度”と定義する。これは小領域内における骨梁の強さを表す指標と考えられる。濃度は次式で表される。

$$G_{I,J} = \frac{1}{10 \times 10} \sum_{m=0}^9 \sum_{n=0}^9 f(10 \times I + m, 10 \times J + n) \quad (1)$$

ここで $f(i,j)$ は画像上の座標 (i,j) における画素濃度を表している。グラフィック上での出力は円の大きさを表す。

•密度：フレーム2に保存されている尾根画像において、小領域内の画素濃度値が255である画素の総和を“密度”と定義する。これは小領域内における骨梁の多さを表す指標と考えられる。密度は次式で表される。

$$D_{I,J} = \frac{1}{10 \times 10} \times \frac{1}{255} \sum_{m=0}^9 \sum_{n=0}^9 f(10 \times I + m, 10 \times J + n) \quad (2)$$

ここで $f(i,j)$ は画素濃度であるが、尾根画像は2値画像であるので、0または255の値である。グラフィック上での出力は円の大きさを表す。

図7 2方向分割

•走行方向：フレーム3に保存されている分割画像において、小領域内の骨梁線の走行方向の角度分布を得る。角度の基準は画像の水平方向であり、範囲は0～180°である。尾根線の方の情報は以下のアルゴリズムによって検出される。

1:ラベリングを行う。

2:ラスタ走査法により尾根線の端を検出する。

3:2:の処理により線分の両端が検出され、それぞれの画像上での座標を $p_{i1}(x_{i1}, y_{i1})$, $p_{i2}(x_{i2}, y_{i2})$ とすると、線分の長さ d_i と角度 θ_i はそれぞれ次式によって得られる。

$$d_i = \sqrt{(x_{i1} - x_{i2})^2 + (y_{i1} - y_{i2})^2} \quad (3)$$

$$\theta_i = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{y_{i1} - y_{i2}}{x_{i1} - x_{i2}} \right) \quad (4)$$

以上の処理をすべてのラベルについて行う。

骨梁の走行方向に関する情報は以下の通りである。

(1)平均：骨梁線の走行方向の角度の平均で、次式によって得られる。

$$\bar{\theta}_{I,J} = \frac{\sum_i \theta_i d_i}{\sum_i d_i} \quad (5)$$

(2)分散：骨梁線の走行方向の角度の分散で、次式によって得られる。

$$s_{I,J}^2 = \frac{\sum_i d_i (\theta_i - \bar{\theta}_{I,J})^2}{\sum_i d_i} \quad (6)$$

グラフィック上での出力は平均方向からの標準偏差として扇形で表示する。扇の角度の1/2が標準偏差を表す。

(3)2方向分割：骨梁線が骨に作用する荷重によって生じる骨内部の主応力線の流れに類似しているとの報告がある。そこで、画像処理によって得られた情報を各小領域ごとに2つの成分で表すことを考える。つまり、図7に示すように平均角度 $\bar{\theta}_{I,J}$ から±45°の範囲とその他の範囲に分けて、それぞれの範囲において平均角度を求める。

(4)ヒストグラム：解析領域全体において骨梁角のヒストグラムを表示する。横軸に角度 $[\theta]$ 、縦軸に角度が θ である骨梁線の長さの総和 $[N(\theta)]$ をとる。

4. 出力結果

4・1 前額面 図8(a)に入力画像, 図8(b)に尾根画像, 図8(c)に分割画像を示す。また, 図10(a)に濃度分布, 図10(b)に密度分布, 図10(c)に骨梁線の角度の平均と分散, 図10(d)に骨梁線の2方向分割を示す。図11に骨梁角ヒストグラムを示す。図10(c), 図10(d)に示す各小領域の線の長さは骨強度に相当する量を表している。本論文では, 濃度 $G_{I,J}$, 密度 $D_{I,J}$ が主に骨梁の強度に関係していると考え, 骨梁の強度 $S_{I,J}$ を,

$$S_{I,J} = G_{I,J} \times D_{I,J} \quad (7)$$

で表される量とする。本研究は画像計測に重点をおいており, 式(7)は厳密に骨梁の強度を示す式ではないが, 骨梁の定性的な性質を知るための指標の1つとして導入している。

4・2 矢状面 図9(a)に入力画像, 図9(b)に尾根画像, 図9(c)に分割画像を示す。また, 図13(a)に濃度分布, 図13(b)に密度分布, 図13(c)に骨梁線の角度の平均と分散, 図13(d)に骨梁線の2方向分割を示す。図14に骨梁角ヒストグラムを示す。

5. 有限要素モデル

骨の内部構造である骨梁に直接働きかける力は荷重によって生じる内部応力である。骨梁が骨内部に作用する応力に適応した形状を有しているとした報告は多くの研究者によって行われている⁽⁴⁾。そこで大腿骨頭の内部応力を2次元有限要素法により解析を行う。本論文では, 大腿骨頭の前額面, 矢状面の有限要素解析を行う。モデルの形状は画像処理で使用した骨のレントゲン像を基に決定し, 荷重は前額面ではPauwelsの理論⁽²⁾(大腿骨頭に作用する荷重は体重の約3倍で, 垂線に対して約16°外向き)を基に, また, 矢状面では, Rydellの報告(垂線から約10°で前方から後方向き)⁽²⁾を基に決定して各要素ごとの主応力を求めた。図12に前額面の解析結果を示す。また図15に矢状面の解析結果を示す。図12, および図15は, 線の長さを主応力の大きさとし, 線の向きは主方向を表したものである。一般的には, 三角形一定要素では主応力線は各要素に対して1組描くのであるのに対し, 画像処理による解析結果と比較し易くするために, 図12, および図15では解析領域を正方形小領域に分割してその頂点に応力線を1組対応させて

(a)入力画像と解析領域

(b)尾根画像

(c)分割画像

図8 前額面画像データ

(a)入力画像と解析領域

(b)尾根画像

(c)分割画像

図9 矢状面画像データ

(a)濃度分布

(b)密度分布

(c)骨梁角分布

(d)2方向分割結果

図10 前額面骨梁分布

図11 骨梁角ヒストグラム(前額面)

図12 FEM解析結果(前額面)

(a)濃度分布

(b)密度分布

(c)骨梁角分布

(d)2方向分割結果

図13 矢状面骨梁分布

図14 骨梁角ヒストグラム(矢状面)

図15 FEM解析結果(矢状面)

表示している。

6. 考察および結言

前額面において、図10の画像処理によって得られた骨梁線の強度の評価と図12の主応力分布を比較すると、線の向き、線の長さ共に類似性が見られる。また図11の骨梁角ヒストグラムから得られる骨梁線の方向はFEMモデルの荷重方向付近(ヒストグラムでは 106° 付近)に多く存在していることがわかる。このように骨頭内に生じる主応力に対して骨梁が骨密度、及びその方向共に適した構造をしていることが見られる。矢状面においては図13の骨梁線の強度の評価では、小領域の多くは2成分が明確に現れている。しかし、図15の主応力分布では、荷重方向に向いている圧縮方向の成分の割合が高い。このことは、図14のヒストグラムをみてわかるように、前額面におけるヒストグラムよりも骨梁線の角度の分散が大きいことが示している。これは人間の歩行などの際の脚の運動によって、荷重の大きさ、方向が多種多様であるために、立脚静止状態の荷重に対し、前者の荷重が大きな比重を占めているためと考えられる。

本研究では画像処理によって骨強度の情報が骨内部の主応力と類似していることを確認した。本研究では骨画像を小領域に分割し、そのそれぞれの領域ごとに骨梁線の強度を大きさと方向を持った量で評価したが、主応力と骨梁の関係に着目して、我々は、この情報を骨内部に生じる主応力と考える。有限要素モデルを用いて骨内部の応力を求める場合、骨形状と荷重の情報をを用いて有限要素法によって各要素ごとに応力を計算する。ここで荷重が未知の場合、骨形状と骨内部の応力分布状態が既知ならば、これらの情報から有限要素逆問題を解くことで数学的に荷重を推定するといった手法が考えられる。このような骨内部の情報の

みで荷重を推定する手法は、骨周囲の筋力などの解剖学的な評価に基づいて力学的モデルを用いて荷重を推定するのとは異なり、あらゆる箇所、あらゆる断面に適応が考えられる。例えば、本研究で解析を行った大腿骨頭の矢状面での立脚静止状態の荷重以外の荷重を、骨梁の形状から数学的に推定すること、また大腿骨頭の横断面や膝の荷重解析などである。本研究では画像処理によって得られる情報から骨梁の評価を行い、FEMデータ作成の段階までを行ったが、今後はこの情報を有限要素逆問題のデータとして利用し、数学的に荷重を推定し、これらの荷重と、股関節荷重のように外部環境からの算定による荷重との比較によって検証を行い、その上で外部環境からの荷重推定が比較的困難な部分の解析を行う予定である。

7. 謝辞

本研究のためにご協力下さいました舞子台病院の司馬良一副院長、神戸大学医学部整形外科中林幹治助手、同西海雅子技官、並びに奈良県立医科大学整形外科富田直秀先生に心より感謝致します。

参考文献

- (1) 司馬・中林・広畑, 整形外科バイオメカニクス, 7, (1985), 59.
- (2) 伊藤編, 股関節外科学, (1982), 117, 金芳堂.
- (3) 津村・司馬, 日関外誌, 10-1, (1991), 37.
- (4) 日本機械学会編, 生体力学, (1991), オーム社.
- (5) IMM-256V8 ユーザーズマニュアル, 三谷商事・ケイオー電子工業, (1985).
- (6) 多田・出口, 第36回応力連合講演会予稿集, (1986), 229.
- (7) 日本工業技術センター編, コンピュータ画像処理入門, (1985), 総研出版.