1245 高精度四面体要素を用いたフリーメッシュ法の前十字靭帯大変形解析

Application of free mesh method using accurate tetrahedral element
to large deformation problems of anterior cruciate ligament

○内川隆 (東大院) 正 矢川元基 (東大院)

Takashi Uchikawa, The University of Tokyo, Hongo7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo
Genki Yagawa, The University of Tokyo

Key Words: large deformation, accurate tetrahedral element, ligament

1. はじめに

近年スポーツの専門性、商業化が強くなる一方でそれに伴う怪我が問題になってきている。一般の人にとってスポーツは現代社会の中では既になくてならない余暇となったが、その一方でスポーツによって怪我をした場合、その怪我によっては仕事を含めた日常生活に甚大な影響を及ぼしかねない。また、プロスポーツ選手に至っては選手生命自体を脅かす怪我も少なくはない。その中でも膝靭帯は複雑で激しい運動を支えるため、靭帯の断裂はスキーをはじめ、様々な競技で重要な問題である。しかし、膝靭帯はその怪我の深刻さにもかかわらず、力学的には不明な点も依然として多く、靭帯断裂の防止に効果的なシミュレーション⁽¹⁾⁽²⁾に関してもほとんど行われていない。

靭帯断裂を防止するには、まず脚部に負荷が加わったときに靭帯にかかる応力分布を求めることが必要である。しかし、従来の有限要素法を用いた場合、六面体要素を用いて解析を行おうとすると精度は高いが、骨や靭帯など複雑な形状をしたものに対して要素生成自体ができず、また、解析の精度が著しく低下してしまうような大変形をした場合にはリメッシングをすることはできない。Voxel Meshを用いた場合には今度は表面が粗くなり、生体に忠実に要素生成をすることができない。また、四面体一次要素を用いて解析を行おうとすればほぼすべてのものに対して要素生成はできるが、解析の精度が低いという問題があった。そこで、本研究ではリメッシングと整合性の良い節点ベース有限要素法であるフリーメッシュ法のシステム (Free Mesh Method:FMM) ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾に回転自由度を有する高精度四面体要素⁽⁷⁾を用いることにより、骨や靭帯のような複雑な形状のものに対しても要素を生成し、かつ精度の高い解析をできるようにする。

2. 解析方法

複雑な曲面形状を多数含む膝靭帯の数値解析においては、従来の機械部品の数値解析のように CAD(Computer Assisted Design)などを用いて解析対象をモデル化することは困難である。したがって、解析対象の形状を正確に把握し、モデル化するためには、解析対象そのものを直接入力データとすることが不可欠である。これまでも、眼球を凍結させ、複数の断面形状の写真を撮り、それを直接解析モデルとして用いた研究⁽⁸⁾も行われている。本研究では、医療分野で人体内部の様子を知るために用いられている MRI(Magnetic Resonance Image)によって膝靭帯の断面画像を撮影し、その断面画像を用いた直接的な形状モデリングを行う。一方応力解析においては、フリーメッシュ法の解析システムを用いる。FMM システムは、入力情報として、解析対象の形状および

境界条件のみを与え、解析内部において形状の要素分割を行うシームレスな節点ベースの有限要素法であり、上記の膝靭帯の形状およびそれに対する境界条件のデータのみで応力解析を行うことができ、またリメッシングや回転自由度を有する高精度四面体要素との整合性もよい方法である。以下に本研究における靭帯の応力解析の流れを示す。

1. MRI 断面画像の入手
2. MRI データからメッシュ生成
3. 境界条件計算
4. 応力解析

以下に本研究のアプローチの詳細を示す。

(1) MRI 断面画像の入手

Fig.1 (a)は入手した MRI 断面画像で、サンプルは著者 (男性: 24 歳) の右膝である。画像は脚に垂直な断面を 4mm 間隔で 30 枚程度撮影した。Fig.1 (b)は Fig.1 (a)から抽出した大腿骨である。

(a) (b)
Fig.1 Cross section of knee

(2) MRI データからメッシュ生成

まず、撮影した MRI 断面画像から、靭帯と骨の部分を領域成長法により別々に抽出する。靭帯に関しては前十字靭帯を抽出し、骨に関しては、大腿骨と頸骨を抽出する。次に、抽出した画像の軸を揃え 2 次元データを重ね合わせることににより 3 次元データを作成する。できた 3 次元データの表面をスムージングし、三角形のパッチで表面を定義し、メッシュ生成を行う。Fig.2 は得られた MRI 断面画像から大腿骨を抽出して作った 3 次元データにスムージングをして作った大腿骨と頸骨の先端部分である。

Fig.2 3D mesh of knee

(3) 境界条件計算

解析する具体的な条件はスキーにおけるファント・フット状態（急激にお尻が膝より下がってしまう状態）を想定しているが、その状態は膝が可能域内で短時間で屈曲することとほぼ等価であるため、膝が屈曲するための境界条件⁽⁹⁾を計算した。

骨は靭帯と比べてた場合、その変形量は無視できるため、剛体として扱い、よって Fig.2 の骨の靭帯に与える境界条件の計算のみに用いた。

(4) 応力解析

上記のように計算した境界条件を靭帯に与えて解析を行う。靭帯の応力-ひずみ特性は厳密には非線形性⁽¹⁰⁾を示すが、おおよそ線形であるとみなし、線形弾性体大変形理論⁽¹¹⁾を用いて解析を行う。

解析に用いる回転自由度を有する高精度要素四面体要素は Fig.3 のような 1 節点に 6 自由度を持つ 4 節点四面体要素で、ねじりや曲げにおいて 10 節点四面体 2 次要素と同等の精度が出ることが確認されている⁽⁷⁾。

Fig.3 TET element Including drilling degrees of freedom

Fig.4 Load vs. deformation

図 4 は、片持ち梁の変位と荷重の厳密解⁽¹²⁾と、四面体 2 次要素による解析結果を示している。P が荷重、L が梁の長

さ、 δ が荷重方向の変位量、 $B=EI$ 、 I は断面 2 次モーメントである。四面体高精度要素における解析結果はまだ示せてはいないが、微小変形分野では四面体 2 次要素と同程度の結果が得られていることと、図 4 から、高精度四面体要素を大変形に用いた場合にも厳密解に近い値が出ると予想される。この結果は講演時に示す。

3. 終わりに

本研究では、膝などの生体を対象としたシミュレーションを計算する際のアプローチを中心に説明してきた。現時点では、モデリングに関しては骨と靭帯のメッシュ作成まで完了し、解析に関しては回転自由度を有する高精度四面体要素を用いた弾性体大変形コードを開発中である。講演時にはこのアプローチを用いた解析結果を示す予定である。

謝辞

本研究の一部は、東京大学生産技術研究所における「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトの支援を受けた。MRI 画像の撮影においては東京都教職員救済組合青山病院に多大な支援を頂いた。また同病院の山岸恒雄氏には膝靭帯に関しての有益な議論を頂いた。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 廣川俊二, 鶴野玲治: 膝前十字靭帯の三次元変形と応力分布(線維束で補強された超弾性体の構成式と有限要素モデル), 日本機械学会論文集(C編), 64 巻 622 号, pp, 1998
- 2) 廣川俊二, 鶴野玲治: 有限要素法による膝十字靭帯の三次元変形と応力分布(第 2 報, モデル解析と可視化シミュレーションの結果), 日本機械学会論文集(C編), 65 巻 632 号, pp, 1999
- 3) G.Yagawa, T.Yamada: Free mesh method; A new mesh method, Int.J.Comput.Mesh, 18, pp383-386, 1996
- 4) G.Yagawa, T.Furukawa: Recent developments of free mesh method, Int. J.Numer. Meth. Engng, 47, pp1419-1443, 2000
- 5) 稲葉正和, 藤澤智光, 矢川元基: 階層型パケットと包装法による並列メッシュ生成法, 日本機械学会 2002 年度年次大会 講演論文集, Vol. I, 37-38, 2000
- 6) 渡部修, 瀬川冬樹: フリーメッシュ法の弾塑性大変形問題への適用, 日本機械学会論文集(A編), 65 巻 630 号, pp268-276, 1999
- 7) 松原仁: 回転自由度を有する高精度四面体要素の開発及びフリーメッシュ法への適用, 琉球大学大学院理工学系研究科環境建設工学専攻修士論文, 2003
- 8) Z.G.Sun, A.Makinouchi: Improved 3D FEM program for simulating the retina detachment operation on an eyeball, RIKEN SYMPOSIUM Computational Biomechanics, pp45-55, 2002
- 9) P.Otte, K-F.Schlegel: Buecherei des Orthopaeden Band 47 Funktionelle Anatomie der Gelenke, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1980
- 10) 林紘三郎: バイオメカニクス, コロナ社, 2000
- 11) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995
- 12) K. E. Bisshop and D.C. Drucker: Large Deflection of Cantilever Beams, Quarterly of Applied Mathematics, vol3, no.3, 1945, p272-275