



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	正常手関節における3次元力学的解析 : 剛体バネモデルを用いた理論的解析
Author(s)	岩崎, 倫政
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(医学)
Dissertation Number	甲第4341号
Issue Date	1998-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3137057
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/52188
Type	doctoral thesis
File Information	000000322247.pdf



正常手関節における3次元力学的解析
— 剛体バネモデルを用いた理論的解析 —

岩崎 倫 政

北海道大学医学部整形外科教室

(主任：金田清志教授)

Three-dimensional biomechanical analysis of normal wrist joint: Theoretical analysis using a rigid body spring model

Norimasa IWASAKI, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine (Director: Prof. Kiyoshi KANEDA, M.D.)

正常手関節における3次元力学的解析 — 剛体バネモデルを用いた理論的解析 —

正常手関節3次元剛体バネモデルを構築し、正常手関節における力学的解析を行った。

筋力分布比(%)は、橈骨手根関節および尺骨手根関節において、橈骨舟状関節で44%、橈骨月状関節で31%、三角線維軟骨では35%であった。手根中央関節においては、月状大変形小変形関節で27%、舟状有頭関節、岩崎倫政、月状有頭関節にお

いて34%、北海道大学医学部整形外科教室

(主任：金田清志教授)

Three-dimensional biomechanical analysis of normal wrist joint: Theoretical analysis using a rigid body spring model

Norimasa IWASAKI, M.D.

Department of Orthopaedic Surgery, Hokkaido University School of Medicine (Director: Prof. Kiyoshi KANEDA, M.D.)

要 旨

正常新鮮屍体上肢のCT画像データを基に手関節3次元剛体バネモデルを作製し、正常手関節における力学的解析を行った。

応力分布比(%)は、橈骨手根関節および尺骨手根裂隙において、橈骨舟状関節で44%、橈骨月状関節で31%、三角線維軟骨では25%であった。手根中央関節においては、舟状大菱形小菱形関節で27%、舟状有頭関節では23%、月状有頭関節において34%、三角有鉤関節で16%であった。

各靱帯の張力分布に関しては、掌側では橈骨月状靱帯、背側では橈骨三角靱帯において最大であり、正常手関節においては、これらの靱帯が力学的に最も重要であると考えられた。さらに、手根骨のkinematicsデータより、これらの靱帯は舟状骨および月状骨の尺側への変位を防ぐ機能的役割を担っていると考えられた。

本研究では3次元理論的モデルを用いることにより、正常手関節全体の関節応力、靱帯張力および手根骨のkinematicsに関する解析を行うことが可能であった。得られた解析結果は過去の実験結果と

も良く相関しており，本解析法は十分に信頼性のおけるものと考えられた。

Three-dimensional rigid body spring model technique. Ten wrist theoretical models were created from the normal anatomical data of each of the ten cadaveric wrists. In this technique, the bones are considered to be rigid bodies interposed by series of springs simulating articular cartilage and constraining ligaments. The carpal bone displacement and the joint forces were determined under the specific load assuming a grasp position. Joint reaction forces were calculated according to the deformation of each spring element. The joint force transmission ratio (%) across the radio-ulno-carpal joint was distributed with 44% at the radio-scaphoid joint, 31% at the radio-lunate joint and 25% at the triangular fibrocartilage. The ratio through the midcarpal joint was the highest at the luno-capitate joint. The most important ligaments in terms of load transmission were the palmar radio-lunate, the dorsal radio-triquetral and the dorsal scapho-lunate ligaments. In the analysis of the carpal kinematics, the carpal bones in the proximal row tended to be displaced ulnarily. Therefore, those ligaments are considered to play an important role in preventing the ulnar translation of the carpal bones. The results derived from the current theoretical analysis are consistent with other experimental values. Following appropriate validation, this model and analysis technique have the possibility of direct clinical application.

Key words: wrist joint (手関節)、biomechanical analysis (生体力学的解析)、rigid-body spring model (剛体バネモデル)

Abstract

Biomechanical analysis of normal wrist joint was performed using a three-dimensional rigid body spring model technique. Ten wrist theoretical models were created from the normal anatomical data of each of the ten cadaveric wrists. In this technique, the bones are considered to be rigid bodies interposed by series of springs simulating articular cartilage and constraining ligaments. The carpal bone displacement and the joint forces were determined under the specific load assuming a grasp position. Joint reaction forces were calculated according to the deformation of each spring element. The joint force transmission ratio (%) across the radio-ulno-carpal joint was distributed with 44% at the radio-scaphoid joint, 31% at the radio-lunate joint and 25% at the triangular fibrocartilage. The ratio through the midcarpal joint was the highest at the luno-capitate joint. The most important ligaments in terms of load transmission were the palmar radio-lunate, the dorsal radio-triquetral and the dorsal scapho-lunate ligaments. In the analysis of the carpal kinematics, the carpal bones in the proximal row tended to be displaced ulnarly. Therefore, those ligaments are considered to play an important role in preventing the ulnar translation of the carpal bones. The results derived from the current theoretical analysis are consistent with other experimental values. Following appropriate validation, this model and analysis technique have the possibility of direct clinical application.

Key words: wrist joint (手関節)、biomechanical analysis (生体力学的解析)、rigid body spring model (剛体バネモデル)

手関節の種々の疾患の病態を理解し、それらに対する適切な治療法を選択する上で、手関節の力学的解析を行うことは極めて重要である。手関節における力学的解析を行う上での実験的研究としては各種のトランスデューサーを用いた屍体実験が盛んに行われている^{5, 23, 25, 26, 27)}。しかし、これらの解析の大部分は橈骨手根関節および尺骨手根裂隙に限られ、手根間関節および手根中央関節のような小関節を含めた手関節全体における応力解析を行った報告は少ない。また実験モデル作製の困難さより、靱帯に関する解析は靱帯切離実験による手根不安定性の発現に関するもの^{7, 12, 24, 28)}や、各靱帯の力学的特性を求めたもの^{4, 15, 16, 20, 21)}が大部分であり、手関節靱帯の張力分布に関する実験的研究は行われていない。

一方、コンピューターテクノロジーの発達に伴い、これら実験的研究の問題点を解決すべく有限要素法や手関節剛体バネモデルを用いた理論的解析による手関節の力学的解析が試みられてきた^{6, 18, 19, 22)}。しかし、これらは2次元解析であり、複雑な3次元構造を持つ手関節のモデル化および解析に

は多くの制限があった。

今回、著者は過去の実験的研究および理論的解析の問題点を解決すべく手関節3次元理論的モデルの開発を試みた。本研究の目的は、正常手関節の解剖学的データに基づく3次元手関節剛体バネモデルを開発し、それを用いて正常手関節全体の関節応力分布、靱帯の張力分布、各手根骨のkinematicsについての定量化と解析を行うことにより、その力学的特徴を知ることである。

対象および方法

1. 3次元解剖学的手関節モデル：

本研究においては、単純X線上病的所見を認めない正常新鮮屍体上肢10体のCT画像データを基に、個々についての3次元手関節モデルを作製した。

CT画像データは、高解像度helical CT scanner (matrix: 512 X 512, Somatom Plus-S, Siemens Medical Systems, Iselin, NJ, U.S.A.)を用いて、横断面および矢状面の2方向の撮影により得た。撮影条件はスライス厚1mm, スライス間隔1mm, テーブル移動速度1mm/secとした。モデル作製の方法は、最

初に横断面の各CT画像毎に骨輪郭をコンピュータグラフィック上にてデジタイズし、それらのデータよりオリジナルプログラムを用いて3次元骨モデルを作製した。本モデルは各中手骨（I-V）、各手根骨、橈骨遠位端および尺骨遠位端より構成されている。次に、各CT画像において関節を構成する隣接した2つの骨間の中央点をデジタイズすることにより関節曲線（joint line）を作製し、さらに、それらを重ね合わせ3次元関節面モデル（計27関節）を作製した（図1）。その際、関節面の方向性が横断面上にある橈骨手根関節、尺骨手根裂隙、手根中央関節および中手手根関節は矢状面のCT画像より作製した。また、矢状面上にある遠位橈尺関節、手根間関節および中手骨間関節は横断面CT画像を用いて作製した。これらの関節面はメッシュ状としてあらわされ、各スクエアには後述する圧縮バネを置くものと仮定した（図2）。作製した関節面モデルは骨モデルにスーパーインポーズし、最後に計48（掌側：29，背側：19）の靱帯をcryo-sectionalデータに基づき解剖学的位置に入力することにより、3次元手関節解剖学的モデルを作製した（図3）。

2. 3次元剛体バネモデル

(R i g i d B o d y S p r i n g M o d e l) :

本研究では，応力計算には R i g i d B o d y S p r i n g M o d e l (以下，R B S M) を用いた^{1, 10)}。R B S M においては骨は剛体，関節軟骨および靱帯はそれぞれ圧縮バネ，伸張バネとしてシミュレーションされる。すなわち，各要素（剛体）はこれらのバネにより連結されていることになる。3次元モデルにおいては，関節面をメッシュ状とし，各々のスクエアに1本の圧縮バネを置くものと仮定する。一方，靱帯は各々の解剖学的特徴に基づき3本～6本の剛性値の等しい伸張バネにより構成されると仮定した。実際の関節および靱帯における応力(F)は，一定の荷重条件下での各要素（厳密には各要素の重心）の変位に基づき，各バネの変形(D)とバネ定数すなわち関節軟骨および各靱帯の剛性値(K)の積($F = K D$)により求められる。

3. 応力解析の実際 :

本解析では g r a s p p o s i t i o n を想定し，第 I 中手骨に 22.5 N，第 I I 中手骨に 33.0 N，第 I I I 中手骨に 42.2 N，第 I V 中手骨に 25.6 N，第 V 中手骨に 19.7 N，計 143 N の外力

を加えた^{6, 22)}。関節軟骨および三角線維軟骨(以下, TFC)の剛性値は 22.6 N/mm とした⁸⁾。各靱帯の剛性値は, 従来より報告されてきた実験値を用いた^{6, 15, 16, 17)}。これらのデータをモデルに入力し, 独自に開発した3次元RBSM用ソフトウェアにて応力計算を行った。

4. データ解析:

本研究では, 正常手関節における以下の力学的パラメーターについての解析を行った。

(1) Percentage of Joint Force Transmission (%JFT):

%JFTは各関節列における応力分布比, すなわち, 各関節における応力(単位: Newton, 以下N)を, その関節が属する関節列の応力の総和(N)で割ったものである。

(2) Joint Peak Pressure (PP)

(3) Percentage of Tensile Force Distribution (%TFD):

%TFDは手関節掌側および背側における各靱帯の張力分布比であり, 各靱帯における張力(N)を掌側または背側の靱帯の張力の総和(N)で割ったものである。

(4) C a r p a l k i n e m a t i c s :

G r a s p p o s i t i o n を想定した荷重条件下における各手根骨の3次元の変位および回転の傾向を示している。

結 果

(1) P e r c e n t a g e o f J o i n t F o r c e T r a n s m i s s i o n (% J F T) :

各関節列における%JFTは表1にまとめた。橈骨手根関節およびTFCにおける%JFTは、橈骨舟状関節で $44 \pm 6\%$ 、橈骨月状関節において $31 \pm 10\%$ 、TFCで $25 \pm 5\%$ であった。手根中央関節においては、舟状大菱形小菱形関節で $27 \pm 5\%$ 、舟状有頭関節では $23 \pm 2\%$ 、月状有頭関節において $34 \pm 8\%$ 、三角有鉤関節で $16 \pm 7\%$ であった。

(2) J o i n t P e a k P r e s s u r e (P P) :

橈骨手根関節におけるPPは、橈骨舟状関節では $3.8 \pm 0.8 \text{ MPa}$ 、橈骨月状関節においては $2.7 \pm 1.1 \text{ MPa}$ であり、両関節のPP比（橈骨舟状関節／橈骨月状関節）は 1.2 ± 0.3 であった。手根中央関節においては、舟状大菱形関節で 2.7 ± 1.6

M P a , 舟状小菱形関節で 4.3 ± 1.3 M P a , 舟状有頭関節では 2.4 ± 0.5 M P a , 月状有頭関節において 1.9 ± 0.7 M P a , 三角有鉤関節で 3.4 ± 1.5 M P a であった (表 2) 。

(3) P e r c e n t a g e o f T e n s i l e F o r c e
D i s t r i b u t i o n (% T F D) :

手関節掌側および背側における各靱帯の % T F D は表 3 に示した。掌側における % T F D は , 橈骨月状靱帯で最大で 26.0 ± 7.9 % であり , 三角有頭靱帯で 8.5 ± 6.6 % , 舟状有頭靱帯で 8.1 ± 4.3 % , 舟状大菱形靱帯において 7.8 ± 5.9 % であった。背側では , 橈骨三角靱帯において最大で 14.8 ± 7.8 % , 舟状月状靱帯で 12.8 ± 5.9 % , 舟状三角靱帯において 10.7 ± 5.2 % であった。

(4) C a r p a l k i n e m a t i c s :

G r a s p p o s i t i o n を想定した荷重条件下における各手根骨の 3 次元変位および回転の傾向は図 4 および表 4 にまとめた。近位手根列において舟状骨と月状骨は , 尺側 / 掌側 / 近位方向に変位していた。しかしながら , 回転方向に関しては舟状骨は掌屈を生じ , 月状骨は背屈する傾向を認めた。遠位手根列

では，各手根骨はほぼ同様の変位および回転傾向を示した。すなわち，橈側／掌側／近位方向への変位傾向を認め，回転方向に関しては背屈する傾向を認めた。

考 察

近年，コンピューターテクノロジーの発達に伴い，種々の理論的手法を用いた関節の応力解析が行われている。特に，複合・小関節であり複雑な解剖学的特徴を持つ手関節においては，トランスデューサーを用いた屍体実験による解析の困難さもあり，RBSMまたは有限要素法を用いた解析が行われてきた^{6, 18, 19, 22)}。しかしながら，これらは2次元モデルを用いたものであり，複雑な3次元の構造を持つ手関節のモデル化には多くの制限があった。今回，著者はこれらの問題点を解決すべく3次元理論的手関節モデルを開発し，力学的解析を行った。本研究は，3次元モデルを用いた初の理論的手関節応力解析である。

Shortら²³⁾は，pressure sensitive filmを用いた屍体実験において，橈骨手根関節および尺骨手根裂隙における応力分布比は橈骨舟状関

節で50%、橈骨月状関節で29%、TFCにおいて21%と報告している。Harraら⁵⁾は、conductive rubber sensorを用いた同様の実験で、応力分布比は橈骨舟状関節で50%、橈骨月状関節で35%、TFCにおいて15%であったと報告している。今回の理論的解析により得られた結果は、橈骨舟状関節で44%、橈骨月状関節において31%、TFCで25%であり、従来報告されてきた実験値と概ね一致するものであった。一方、Viegasら²⁷⁾は、pressure sensitive filmを用いた実験より、手根中央関節の応力分布比は、舟状大菱形小菱形関節で24%、舟状有頭関節では24%、月状有頭関節において32%、三角有鉤関節で20%であったと報告している。本研究における応力分布比は、舟状大菱形小菱形関節で27%、舟状有頭関節で23%、月状有頭関節において34%、三角有鉤関節では16%であった。これらの結果もViegasら²⁷⁾の実験値とほぼ一致するものであった。これら過去の実験データとの比較検討より、今回開発した3次元理論的モデルによる力学的解析およびその結果は十分に信頼性のあるものと考えられた。

靱帯の張力分布に関する解析結果においては、正

常手関節の掌側では橈骨月状靱帯が、背側では橈骨三角靱帯が力学的に最も重要な靱帯であると考えられた。手根骨の *kinematics* から得られたデータでは、舟状骨と月状骨は橈骨に対して尺側に変位する傾向があることが明らかになった。これらの *kinematics* データと橈骨月状靱帯および橈骨三角靱帯の走行の解剖学的特徴より、これらの靱帯は舟状骨および月状骨の尺側への変位を防ぐ機能的役割を担っていると考えられる。Linscheidら^{1,3)} は、橈骨手根靱帯は舟状骨および月状骨の尺側変位を防ぐ働きをしており、臨床的にも重要であると報告している。Blevensら²⁾ は、屍体実験において橈骨手根靱帯の切離により、手根骨の尺側変位が生じたと報告している。同様にViegasら^{2,8)} も、橈骨手根靱帯の切離実験により手根骨の尺側変位が認められたと報告している。さらに、Horiiら⁷⁾ は、*volar intercalated segmental instability* (VISI) に関する実験的研究結果より背側橈骨三角靱帯の力学的重要性について報告している。これらの手関節靱帯に関する臨床的・実験的研究結果は、今回の理論的解析結果を支持するものである。

手根骨の *kinematics* に関する実験的研究は多

く行われてきた^{3, 11, 29)}が、それらは手関節の掌背屈および橈尺屈に伴うものであり、一定の荷重条件下におけるkinematicsに関しては、実験手技上の困難さもあり明らかではない。本研究においては、3次元理論的モデルにより日常動作において頻回に行われるgrasp positionを想定した荷重条件下での手根骨の3次元kinematicsの傾向を解析することが可能であった。本解析結果より近位手根列においては、各手根骨は尺側／掌側／近位方向に変位していた。しかしながら、回転方向に関しては舟状骨は掌屈、月状骨は背屈する傾向が認められた。Kauerら⁹⁾は、月状骨は矢状面においては掌側に開く楔状を呈しており、有頭骨よりの圧力を受けることにより月状骨は背屈する傾向があるだろうと述べている。Linscheidら¹⁴⁾は、遠位手根列は常に舟状骨を掌屈させるような圧力を与えていると報告している。これら過去の報告は、今回得られたkinematicsに関する結果を支持するものであり、日常生活動作における荷重条件下においても舟状骨と月状骨はdorsal intercalated segmental instability (DISI) をきたすような条件下にあると考えられた。一方、遠位手根列における各手根骨は変位、回転とも同様の傾向を

示し、各手根骨は橈側に変位する傾向を認めた。これは近位手根列の手根骨が尺側変位する傾向があるのとは反対の結果である。これらの結果より、遠位手根列は機能的にも近位手根列とは区別した一機能単位としてとらえることが可能であると考えられた。

手関節の解剖学的特徴としては、各中手骨、各手根骨、橈骨および尺骨が多数の靱帯により連結されており、多くの解剖学的に複雑な小関節が存在することである。したがって、手関節の病的状態や手術後の力学的効果についての解析を行う際には、これら多くの関節および靱帯の応力解析を統合して行うべきである。しかし、現時点での実験的研究においては、手技上の困難さから応力解析が可能な関節、靱帯は限られている。今回の3次元理論的解析では、正確な解剖学的モデルに基づき、手関節全体における関節および靱帯の応力解析と手根骨の *kinematics* についての解析を同時に行うことが可能であり、従来の実験的研究における手技上の制限を克服することが可能であったと考えられる。

今回開発した3次元手関節モデルによる力学的解析結果は過去の屍体実験のデータとも良く相関しており、正常手関節における解析においては十分に信頼性のあるものと考えられた。しかし、病的状態

においては軟骨および靱帯の剛性値等は正常な状態と比較し変化しているものと考えらる。したがって、今後、本モデルを病的状態の解析にも応用していくには、個々の疾患に関する解剖学的および物性値に関するデータを入力し、応力計算に必要な条件設定を新たに決定する必要がある。将来的に、これらが可能となると、本モデルは日常の臨床の場合においても、種々の複雑な手関節疾患に対する術前プランニング等に用いることが可能になると考える。

結 語

1. 3次元剛体バネモデルを用いて、正常手関節における力学的解析を行った。

2. 橈骨手根関節および尺骨手根裂隙における応力分布は、橈骨舟状関節で44%、橈骨月状関節において31%、TFCで25%であった。手根中央関節においては、舟状大菱形小菱形関節で27%、舟状有頭関節では23%、月状有頭関節において34%、三角有鉤関節で16%であった。

3. 靱帯の張力分布は、掌側では橈骨月状靱帯、背

側では橈骨三角靱帯において最大であり，これらの靱帯が正常手関節において力学的に最も重要であると考えられた。さらに，手根骨の *k i n e m a t i c s* データより，これらの靱帯は舟状骨および月状骨の尺側への変位を防ぐ機能的役割を担っていると考えられた。

4．本研究は手関節における初の3次元理論的応力解析である。今回得られた結果は過去の実験および臨床データとも良く相関しており，本モデルを用いた理論的解析は十分に信頼性のあるものと考えられた。

謝 辞

稿を終えるにあたり，懇切な御指導，御校閲を賜りました北海道大学保健管理センター 三浪明男教授ならびに北海道大学整形外科学講座 金田清志教授に深甚なる謝意を表します。実験研究の直接指導を頂いた米国ジョーンズホプキンス大学整形外科学講座 E d m u n d Y . S . C h a o 教授ならびに労災リハビリテーション工学センター 元田英一先生に感謝いたします。

文献

1. An, K.N., Himeno, S., Tsumura, H., et al.: Pressure distribution on articular surfaces: Application to joint stability evaluation. *J. Biomech.*, 23: 1013-1020, 1990.
2. Blevens, A.D., Light, T.R., Jablonsky, W.S., et al.: Radiocarpal articular contact characteristics with scaphoid instability. *J. Hand Surg.*, 14A: 781-790, 1989.
3. De Lange, A., Kauer, J.M.G., Huiskes, R.: Kinematic behavior of the human wrist joint: A roentgen-stereophotogrammetric analysis. *J. Orthop. Res.*, 3: 56-64, 1985.
4. De Lange, A., Huiskes, R., Kauer, J.M.G.: Wrist-joint ligament length changes in flexion and deviation of the hand: An experimental study. *J. Orthop. Res.*, 8: 722-730, 1990.
5. Hara, T., Horii, E., An, K.N., et al.: Force distribution across wrist joint: Application of pressure-sensitive conductive rubber. *J. Hand Surg.*, 17A: 339-347, 1992.
6. Horii, E., Garcia-Elias, M., An, K.N., et al.: Effect on force transmission across the carpus in procedures used to treat Kienböck's disease. *J. Hand Surg.*, 15A: 393-400, 1990.
7. Horii, E., Garcia-Elias, M., An, K.N., et al.: A kinematic study of lunotriquetral dissociations. *J. Hand surg.*, 16A: 355-362, 1991.
8. Ide, T., Yamamoto, Y., Tatsugi, S.: Validation study of the Rigid Body Spring Model using the metacarpophalangeal joint. In: *Biomechanics in Orthopedics*, pp 299-306. Ed by S. Niwa, S.M. Perren, T. Hattori. Tokyo, Springer-Verlag, 1992.
9. Kauer, J.M.G.: The mechanism of the carpal joint. *Clin. Orthop.*, 202: 16-26, 1986.
10. Kawai, T.: A new element in discrete analysis of plane strain problem. *Seisan Kenkyu*, 29: 204-207, 1977.
11. 小林昌幸, Linscheid, R.L., Berger, R.A., 他: 正常手関節における手根骨のキネマティクス. *日手会誌*, 11: 55-58, 1994.
12. 小林昌幸, Linscheid, R.L., Berger, R.A., 他: 舟状月状骨靱帯切離が手根骨動態に及ぼす影響. *日手会誌*, 11: 59-62, 1994.
13. Linscheid, R.L., Dobyns, J.H., Beabout, J.W., et al.: Traumatic instability of the wrist. *J. Bone Joint Surg.*, 54A: 1612-1632, 1972.
14. Linscheid, R.L.: Kinematic considerations of the wrist. *Clin. Orthop.*, 202: 27-39, 1986.
15. Logan, S.E., Nowak, M.D.: Intrinsic and extrinsic wrist ligaments: Biomechanical and functional differences. *Biomed. Sci. Instrum.*, 23: 9-13, 1987.
16. Mayfield, J.K., Johnson, R.P., Kilcoyne, R.F.: The ligaments of the wrist and their functional significance. *Anat. record.*, 186: 417-428, 1976.

- 1 7 . Mayfield, J.K.: Pathogenesis of wrist ligament instability. In: *The Wrist and Its Disorders*, pp 53-73. Ed by Lichtman D.M., Philadelphia, W. B. Saunders, 1988.
- 1 8 . Miyakawa, T., Hashizume, H., Inoue, H., et al.: Malunited Colles' fracture. Analysis of stress distribution. *J. Hand Surg. Br.*, 19(6): 737-742, 1994.
- 1 9 . Penrose, J.M., Williams, N.W., Hose, D.R., et al.: An examination of one-piece metacarpophalangeal joint implants using finite element analysis. *J. Med. Eng. Technol.*, 20: 145-150, 1996.
- 2 0 . Savelberg, H.H.C.M., Kooloos, J.G.M., Huiskes, R., et al.: Strains and forces in selected carpal ligaments during in vitro flexion and deviation movements of the hand. *J. Orthop. Res.*, 10: 901-910, 1992.
- 2 1 . Savelberg, H.H.C.M., Kooloos, J.G.M., Huiskes, R., et al.: An indirect method to assess wrist ligament forces with particular regard to the effect of preconditioning. *J. Biomechanics*, 26: 1347-1351, 1993.
- 2 2 . Schuind, F., Cooney, W.P., Linscheid, R.L., et al.: Force and pressure transmission through the normal wrist. A theoretical two-dimensional study in the posteroanterior plane. *J. Biomechanics*, 28: 587-601, 1995.
- 2 3 . Short, W.H., Werner, F.W., Fortino, M.D., et al.: Distribution of pressures and forces on the wrist after simulated intercarpal fusion and Kienböck's disease. *J. Hand Surg.*, 17A: 443-449, 1992.
- 2 4 . Short, W.H., Werner, F.W., Fortino, M.D., et al.: A dynamic biomechanical study of scapholunate ligament sectioning. *J. Hand Surg.*, 20A: 986-999, 1995.
- 2 5 . Tencer, A.F., Viegas, S.F., Cantrell, J., et al.: Pressure distribution in the wrist joint. *J. Orthop. Res.*, 6: 509-517, 1988.
- 2 6 . Viegas, S.F., Tencer, A.F., Cantrell, J., et al.: Load transfer characteristics of the wrist. Part I. The normal joint. *J. Hand Surg.*, 12A: 971-978, 1987.
- 2 7 . Viegas, S.F., Patterson, R.M., Todd, P.D., et al.: Load mechanics of the midcarpal joint. *J. Hand Surg.*, 18A: 14-18, 1993.
- 2 8 . Viegas, S.F., Patterson, R.M., Ward, K.: Extrinsic wrist ligaments in the pathomechanics of ulnar translation instability. *J. Hand Surg.*, 20A: 312-318, 1995.
- 2 9 . Youm, Y., McMurtry, R.Y., Flatt, A.E., et al.: Kinematics of the wrist. An experimental study of radio-ulnar deviation and flexion-extension. *J. Bone Joint Surg.*, 60A: 423-431, 1978.

表 1

Percentage of Joint Force Transmission at Each Joint

<i>Joint</i>	<i>Percentage of Joint Force Transmission (%)</i>
<i>Radio-ulno-carpal</i>	
Radio-scaphoid	44 ± 6
Radio-lunate	31 ± 10
TFC	25 ± 5
<i>Midcarpal</i>	
Scapho-trapezio-trapezoidal	27 ± 5
Scapho-capitate	23 ± 2
Luno-capitate	34 ± 8
Triquetral-hamate	16 ± 7
<i>Proximal row</i>	
Scapho-lunate	59 ± 16
Luno-triquetral	41 ± 16
<i>Distal row</i>	
Trapezio-trapezoidal	30 ± 9
Trapezoid-capitate	18 ± 12
Capitate-hamate	52 ± 11
Mean ± SD	

Percentage of Tensile Force Distribution at Each Ligament

表 2
Percentage of Tensile Force Distribution (%)

Joint Peak Pressure at Each Joint	
Joint	Joint Peak Pressure (MPa)
<i>Radio-ulno-carpal</i>	
Radio-scaphoid	3.8 ± 0.8
Radio-lunate	2.7 ± 1.1
TFC	2.1 ± 1.7
<i>Midcarpal</i>	
Scapho-trapezium	2.7 ± 1.6
Scapho-trapezoid	4.3 ± 1.3
Scapho-capitate	2.4 ± 0.5
Luno-capitate	1.9 ± 0.7
Triquetral-hamate	3.4 ± 1.5
<i>Proximal row</i>	
Scapho-lunate	2.8 ± 1.8
Luno-triquetral	2.0 ± 1.5
<i>Distal row</i>	
Trapezio-trapezoidal	1.7 ± 0.7
Trapezoid-capitate	2.7 ± 1.8
Capitate-hamate	3.0 ± 1.1
Mean $\pm$ SD	
Luno-triquetral	3.4 ± 4.5
Trapezium-trapezoid	4.6 ± 5.9
Capitate-trapezoid	4.5 ± 3.8
Capitate-hamate	9.6 ± 6.8
Distal radio-ulnar	9.5 ± 9.1
Mean $\pm$ SD	

表 3

Percentage of Tensile Force Distribution at Each Ligament

<i>Ligament</i>	<i>Percentage of Tensile Force Distribution (%)</i>
<i>Volar</i>	
Radio-scaphoid	0 ± 0
Radio-capitate	0 ± 0
Radio-lunate	26.0 ± 7.9
Ulno-lunate	2.4 ± 3.3
Ulno-capitate	1.8 ± 3.6
Ulno-triquetral	0.7 ± 2.4
Scapho-lunate	3.9 ± 4.8
Luno-triquetral	4.5 ± 4.2
Trapzium-trapezoid	0.7 ± 1.4
Capitate-trapezoid	3.1 ± 3.8
Capitate-hamate	2.2 ± 3.2
Scapho-trapezoid	7.8 ± 5.9
Scapho-capitate	8.1 ± 4.3
Triquetral-capitate	8.5 ± 6.6
Triquetral-hamate	0.7 ± 1.4
Distal radio-ulnar	5.4 ± 6.4
<i>Dorsal</i>	
Radio-triquetral	14.8 ± 7.8
Scapho-lunate	12.8 ± 5.9
Scapho-triquetral	10.7 ± 5.2
Luno-triquetral	2.8 ± 4.5
Trapzium-trapezoid	6.6 ± 5.9
Capitate-trapezoid	4.5 ± 3.8
Capitate-hamate	9.6 ± 6.8
Distal radio-ulnar	5.5 ± 5.5

Mean $\pm$ SD

図 1. 3次元関節面モデルの作成

各CTスライス係に関節面線 (joint line) をデジタル化し、それらを重ね合わせることで、3次元関節面モデル (メッシュ状) を作成した。

図 2. 3次元手関節関節面モデル

図 2 の関節面よりなる手関節全体の3次元関節面モデルである。関節面はメッシュ状としてあらわされ、各メッシュには関節軟骨をシミュレーションする圧縮バネを置くものと仮定した。数字、白丸印は各手関節骨および中手骨の中心 (重心) 点をあらわす。

2:三角骨, 3:舟状骨, 4:舟状骨, 5:大基形骨, 6:小基形骨, 7:有頭骨, 8:有頭骨, 9:豆状骨, 10~14:第1~5中手骨

表 4

Carpal Kinematics of Normal Wrist Joint

Carpal bone	Translation (mm)			Rotation (degree)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Scaphoid	-0.18	0.84	-0.82	0.06	0.07	-0.09
Lunate	-0.25	0.38	-0.20	-0.01	0.05	-0.07
Triquetrum	0.04	-0.51	-0.15	-0.04	0.08	-0.05
Trapezium	0.71	1.43	-2.34	-0.07	0.20	-0.15
Trapezoid	1.88	0.84	-3.24	-0.12	0.17	-0.13
Capitate	1.07	0.03	-0.95	-0.08	0.14	-0.14
Hamate	1.00	-1.37	-0.22	-0.08	0.15	-0.15

Mean

図に関する解説

図1. 3次元関節面モデルの作製

各CTスライス毎に関節曲線 (joint line) をデジタイズし、それらを重ね合わせるることにより3次元関節面モデル (メッシュ状) を作製した。

図2. 3次元手関節関節面モデル

計27の関節よりなる手関節全体の3次元関節面モデルである。関節面はメッシュ状としてあらわされ、各スクエアには関節軟骨をシミュレーションする圧縮バネを置くものと仮定した。数字、白丸印は各手根骨および中手骨の中心 (重心) 点をあらわす。

2: 三角骨, 3: 月状骨, 4: 舟状骨, 5: 大菱形骨, 6: 小菱形骨, 7: 有頭骨, 8: 有鉤骨, 9: 豆状骨, 10~14: 第I~V中手骨

図3. 3次元手関節解剖学的モデル

A: 手関節掌側像, B: 尺側像。直線 (黒) は靱帯をあらわし、各靱帯は3~6本の直線としてシミュレーションされている。

図4. 手根骨の変位および回転方向

変位:

X軸: (+) 橈側, (-) 尺側, Y軸: (+) 掌側, (-) 背側,

Z軸: (+) 遠位, (-) 近位

回転:

X軸: (+) 掌屈, (-) 背屈, Y軸: (+) 橈屈, (-) 尺屈,

Z軸: (+) 回外, (-) 回内

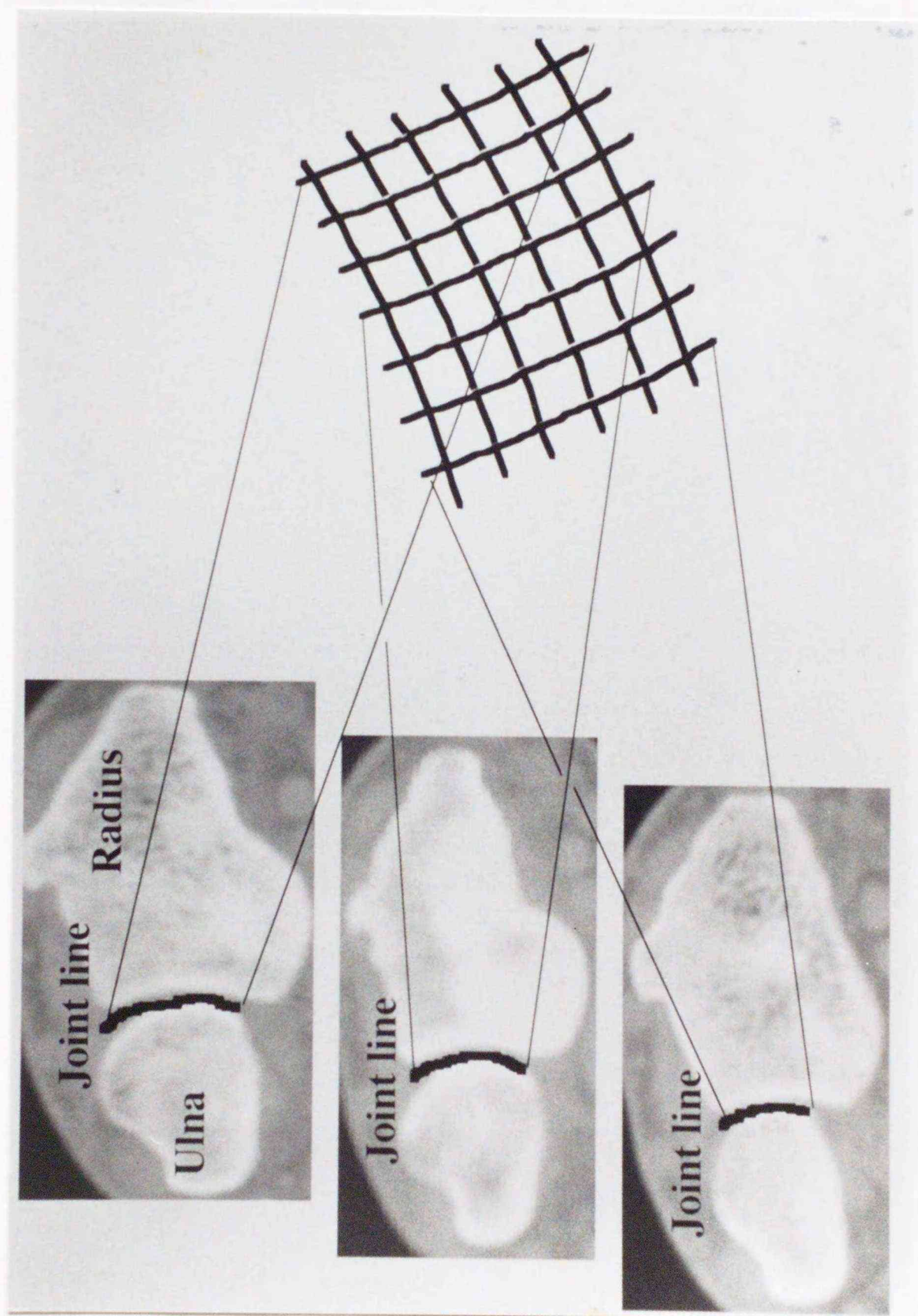


图 1

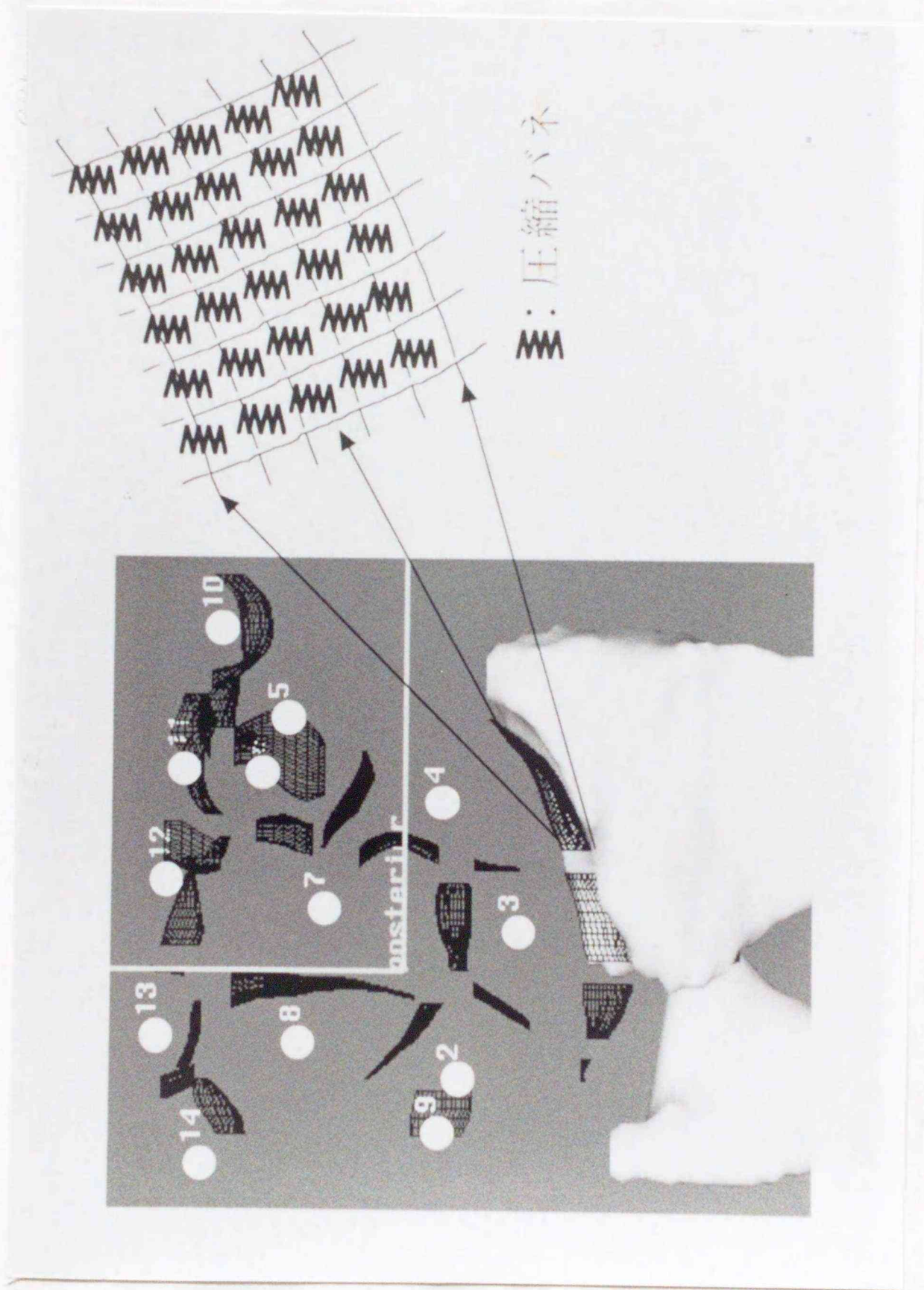
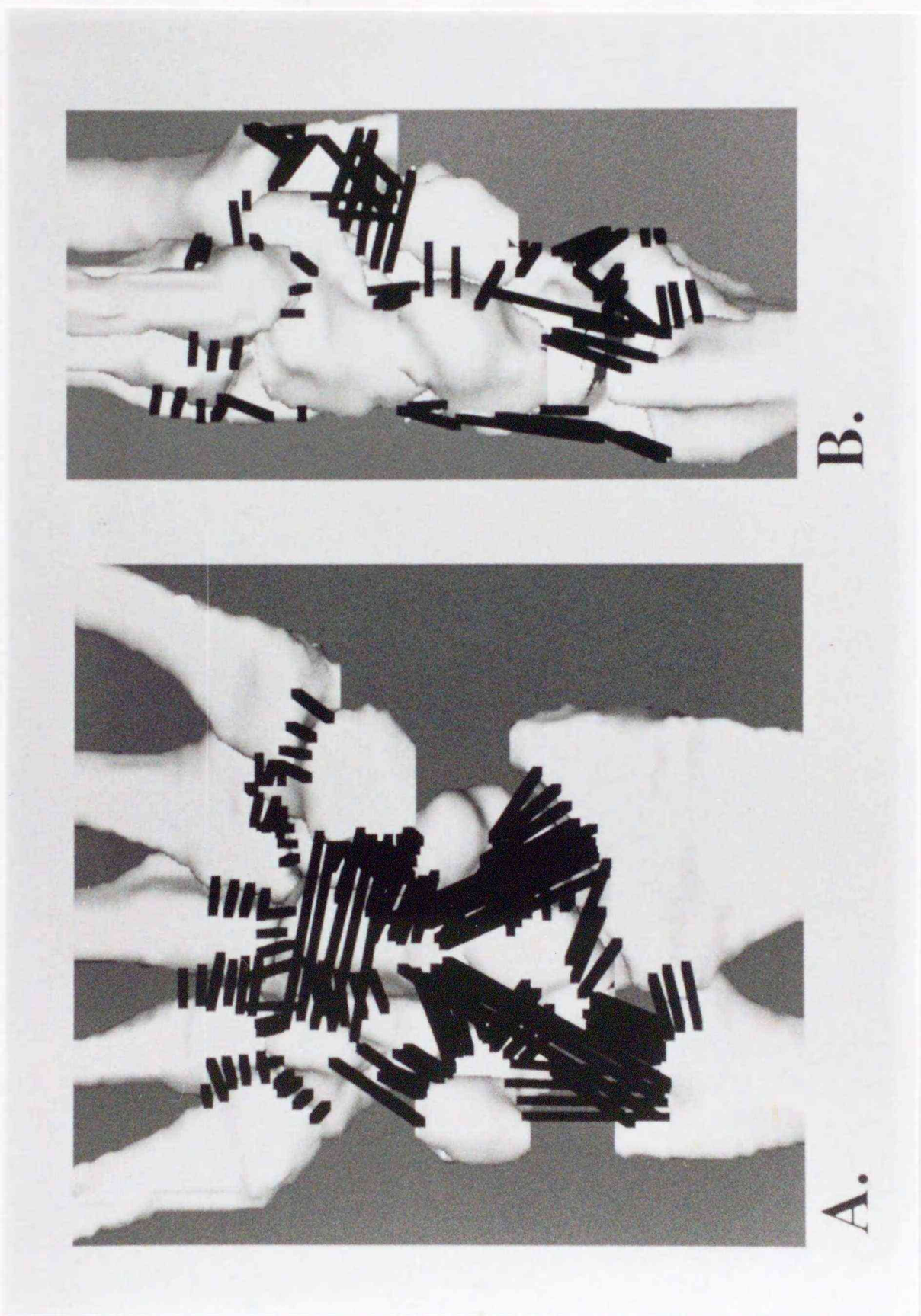


図 2



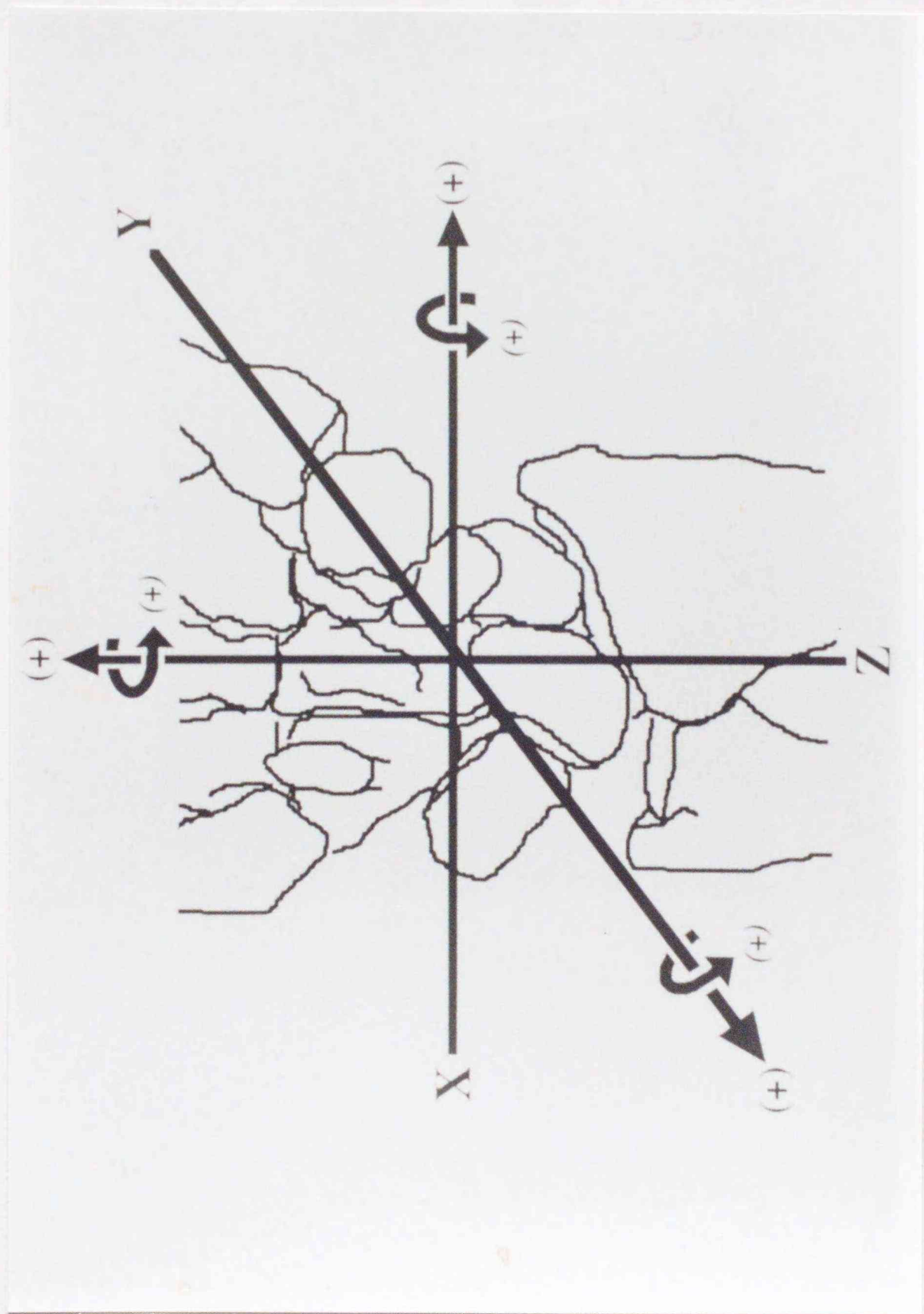


图 4



