

新型脊椎試験機の開発

藤原基芳*, 増田峰知*, 池浦良淳**, 稲葉忠司**, 笠井裕一***

Development of a New Spine Tester

Motoyoshi FUJIWARA, Takanori MASUDA,
Ryojun IKEURA, Tadashi INABA and Yuichi KASAI

From FY 2004 to 2005, we developed a 6-axis material tester using robot technology. This tester has been used for the study of mechanical properties of spine for more than 10 years and has achieved many medical findings. However, we also found some points which should be improved. Therefore, we developed a new 6 axis tester. In this report, we present improvements of the hardware and software of the new tester.

Key words: 6-Axis Material Tester, Robot Technology, Mechanical Properties of Spine, Hybrid Control, Articulated Robot

1. はじめに

著者らは平成 16 年度から 17 年度にかけてロボット技術を応用した 6 軸材料試験機を開発した¹⁾²⁾³⁾。著者らが知る限りでは、このような X, Y, Z 軸の各軸方向/各軸周り毎に力/トルクまたは速度/角速度を指定できる試験機は日本初であり、現時点においても日本唯一である。

この試験機は 10 年以上にわたり三重大学医学部, 工学部において脊椎の力学的特性の研究に使用され, 多くの医学的知見をもたらした。特に椎体の可動性 (ROM : range of motion) を視覚的に示すことにより, 脊椎の強度特性, 及び脊椎を補強するインプラントの固定性をわかりやすく示すことができた^{4),5)他}。

しかし, この試験機を用いた研究が進むにつれて改良するべき点も分かってきた⁶⁾。そこで, 平成 28 年度から今年度にかけて, この試験機を改良し

た新型 6 軸材料試験機を開発した。

本報では新型 6 軸材料試験機のハードウェア, ソフトウェアの改良点を報告する。

2. 旧型 6 軸材料試験機について

2. 1 脊椎の運動

脊椎の基本的な強度評価には, 図 1 に示す機能的脊椎単位 (FSU) が用いられる⁷⁾。FSU は隣接する 2 骨とそれらを連結する椎間板, 椎間関節,

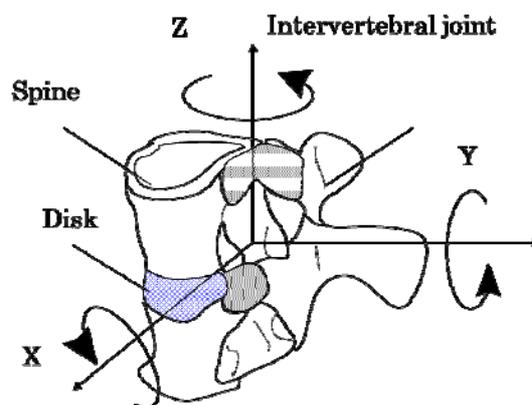


図 1 機能的脊椎単位(FSU)

* 電子機械研究課
** 三重大学大学院工学研究科
*** 三重大学大学院医学系研究科

靱帯で構成される。FSU において下位椎体を固定した場合、上位椎体の位置・姿勢は 6 パラメータで表現できる。よって、脊椎強度評価のためには位置・姿勢と力・トルクの 12 パラメータが必要である。よって、これらを計測するためには、6 自由度以上のロボット機構と 6 軸の力センシングを組み合わせた装置が必要である。

2. 2 旧型 6 軸材料試験機のハードウェア⁶⁾

図 2 に示すように、本試験機（以下、旧型試験機）は 6 自由度平行メカニズムに力制御を採用した。機構原理及び外観は、図 3 に示すように、直動アクチュエータを 2 本一組にして 120°対称に配置し、両端にボールジョイントを備えた 6 本リンクで一つのエンドエフェクタを保持する機構である。

本機構の特徴は、アクチュエータ出力に比して手先の出力が大きいこと、アクチュエータ本体を固定できるため手先可動部が軽くなること、動作領域がフレーム内に収まり実用安全性に優れていること、駆動源に汎用直動軸（モーター+ボールねじ）が使用でき低コストに実現できることなどが挙げられる。

旧型試験機は 2 椎骨 1 椎間の脊椎の試験を想定



図 2 6 軸材料試験機(旧型)

して製作した。設計上の動作領域は半径 100 mm（姿勢変化なし）、X, Y 軸まわりの姿勢変化 30°（原点位置）である。Z 軸方向の出力上限は 200 N であるが、これは力覚センサの定格による。

2. 3 旧型 6 軸材料試験機の制御側²⁾

制御は、エンドエフェクタに取り付けた 6 軸力覚センサで検出した力/トルクを手先速度・角速度に変換するダンピング制御を採用している。ダンピング制御の制御側は下記の通りである。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_d + \mathbf{S}\mathbf{f}$$

ただし、 $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z \ r_x \ r_y \ r_z]^T$ 、試験機への指令速度/角速度を示すベクトル。 v_x, v_y, v_z はそれぞれ X, Y, Z 軸方向への速度を表す。 r_x, r_y, r_z はそれぞれ X, Y, Z 軸周りの角速度を表す。

$\mathbf{v}_d = [v_{dx} \ v_{dy} \ v_{dz} \ r_{dx} \ r_{dy} \ r_{dz}]^T$ 、試験機の目標速度/角速度を表すベクトル。 v_{dx}, v_{dy}, v_{dz} はそれぞれ X, Y, Z 軸方向への速度を表す。 r_{dx}, r_{dy}, r_{dz} はそれぞれ X, Y, Z 軸周りの角速度を表す。

$\mathbf{S} = \text{diag}[S_{fx} \ S_{fy} \ S_{fz} \ S_{mx} \ S_{my} \ S_{mz}]$ 、力（トルク）制御か速度（角速度）制御かを選択する行列。 \mathbf{S} の各要素 S_i （ $i=fx, \dots, mz$ ）について対応する座標軸 i が力（トルク）制御を行う場合は

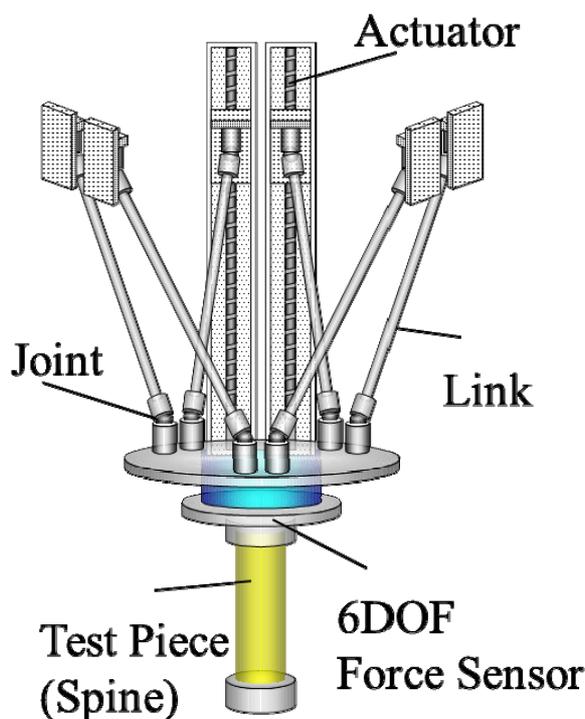


図 3 6 軸材料試験機(旧型)の構造

$s_j=1$,速度(角速度)制御を行う場合には $s_j=0$ と
おく。

$B = \text{diag}[B_{fx} \ B_{fy} \ B_{fz} \ B_{mx} \ B_{my} \ B_{mz}]$,
アドミッタンス. 力覚センサに検出される力/トルク
に応じて指令速度を変更するための係数. B_{fx} ,
 B_{fy} , B_{fz} は力覚センサに検出される X, Y, Z 軸方
向の力を X, Y, Z 方向の指令速度に反映させるた
めの係数, B_{mx} , B_{my} , B_{mz} は力覚センサに検出さ
れる X, Y, Z 軸周りのトルクを X, Y, Z 軸周り
の指令角速度に反映させるための係数.

$f = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T$, 力覚センサに
検出される力/トルク. f_x , f_y , f_z はそれぞれ X,
Y, Z 軸方向の力, m_x , m_y , m_z はそれぞれ X, Y,
Z 軸周りのトルクを表す.

この位置・力ハイブリッド制御手法を用いること
により, X, Y, Z 軸の各軸方向/各軸周りの制御
を力/トルクにするか,速度/角速度にするか任意
に選択することが出来る.

3. 新型 6 軸材料試験機の改良点

3. 1 ハードウェア

旧型試験機には以下の改良を要する点があった.

- ①県内企業において特注で製作したため,製作時に
部品の微小な寸法誤差,微小な配置誤差から生じる
機構全体の誤差の補正に労力を要した.
- ②脊椎固定手術では,固定した椎間の隣接椎間板に
大きな負荷を与えることが経験的に知られている⁸⁾.
隣接椎間板への影響を評価するには,3 椎骨 2
椎間以上の多椎試験片による評価が必要であるが,
旧型試験機は動作領域(半径 100 mm),及び変位
角(30°)が小さく,多椎の試験は難しかった.
- ③図 4 に示すように試料(主にイノシシの脊椎)



図 4 試料の固定治具(旧型)

を固定する治具(以下,固定治具)が円形であった
ため,回旋時にすべりが生じる場合があった.

上記の改良を要する点を考慮して,平成 28 年度
に図 5 に示す新型 6 軸材料試験機(以下,新型試
験機)のハードウェアを調達した.新型試験機の改
良点は下記のとおりである.

- ・①,②に対しては,新型試験機では動作範囲が広



図 5 6 軸材料試験機(新型)



図 6 試料の固定治具(新型)

く (カタログの図面では, 動作領域長 500 mm 以上, 変位角 90° 以上), 購入した時点で精度保証がされている市販の 6 軸多関節型ロボットを採用した。

・③に対しては, 図 6 に示すように回旋時のすべり対策として試料の固定治具を角形とした。

ただし, 図 7 に示すように多関節型ロボットは特定の方向に動作範囲が広く別の方向には動作範囲が狭いという欠点がある。この欠点を補うため新型試験機では曲げる方向に応じて試料全体を回転させて, ロボットの動作範囲が広い方向を使うこととした。

3. 2 ソフトウェア

旧型試験機のソフトウェアについては以下の改良を要する点があった。

①Linux のコマンドラインで試験機の操作をするソフトウェアのためユーザーインターフェースが良くなかった。

②旧型試験機を用いて脊椎の研究を進めた結果, 必要な試験条件, 試験方法が定まってきた。しかし,

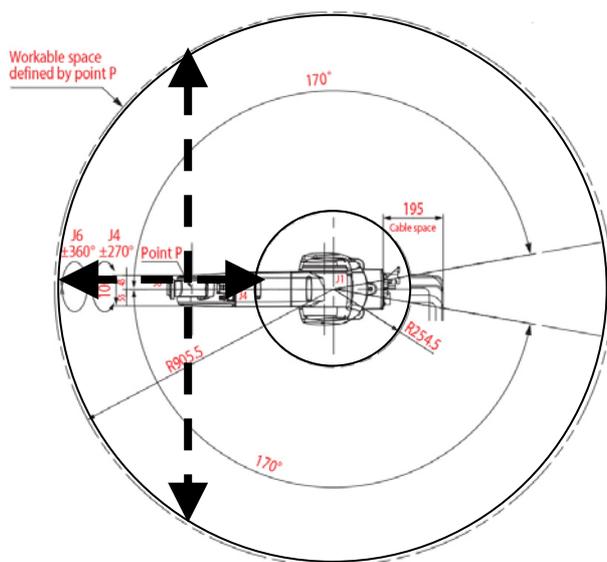


図 7 新型試験機の動作範囲

(<https://www.densorobotics-europe.com/ja/system/files/file/tables/pdf/newvs/Newvs087EN.pdf> に加筆)

図はロボットを上から見たところ。

ハッチングの部分がロボットの動作範囲。

太い点線が脊椎試験機として使用する場合の動き。動作範囲が図の縦方向に広く横方向に狭い。

旧型試験機では試験をするたびに毎回手入力です試験条件を設定し, 使用者が計測値をディスプレイで見ながら操作をする必要があった。

③試験機の使用者がアドミッタンス **B** を変更できないようになっていた。旧型試験機は主に単椎間の試料の試験をしていたが, 新型試験機では単椎間のみならず多椎間の試験も想定している。椎間数が変わると試料の力学的特性が変わるため, 試料の椎間数に応じてアドミッタンスを変更する必要がある。

上記の改良すべき点を考慮して, 平成 29 年度に新型試験機のソフトウェアを調達した。新型試験機の改良点は下記のとおりである。

・①に対しては, 図 8, 図 9 に示すように試験前の試料の固定～実験までの流れに沿って各段階ごとに専用 GUI 画面をもうけた。

・②に対しては, 決まった手順の曲げ試験, 回旋試験を頻繁に行うので, これらの試験については図 9 に示すように専用の GUI 画面をもうけた。また, これらの試験については試験開始から終了まで自動で行えるようにした。

・③に対しては, 試験条件の設定値をファイルに保存し, 読み込むことが出来るようにした。アドミッタンスの設定値についても保存, 読み込みができるようにした。

新型試験機は平成 30 年 3 月時点において, 三重大学工学部において試用中である。今後細かい改良を行う予定である。

4. まとめ

著者らが平成 16 年度から 17 年度にかけて開発した 6 軸材料試験機は, 10 年以上にわたり三重大学医学部, 工学部において脊椎の力学的特性の研究に使用されてきた。しかし, この試験機を用いた研究が進むにつれて改良するべき点も分かってきた。そこで, 平成 28 年度から 29 年度にかけてこの試験機を改良した新型 6 軸材料試験機を開発した。

脊椎インプラントの臨床的なニーズは小児脊椎手術の進歩や高齢者脊椎患者の急増に伴い, 今後急激に増加することが予測されている (http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/healthcare/downloadfiles/ihuku_GL/201512.29.pdf)。個人の疾患に応じたカスタムメイド化や, アジア人種



図 8 新型試験機の GUI(スタート画面)

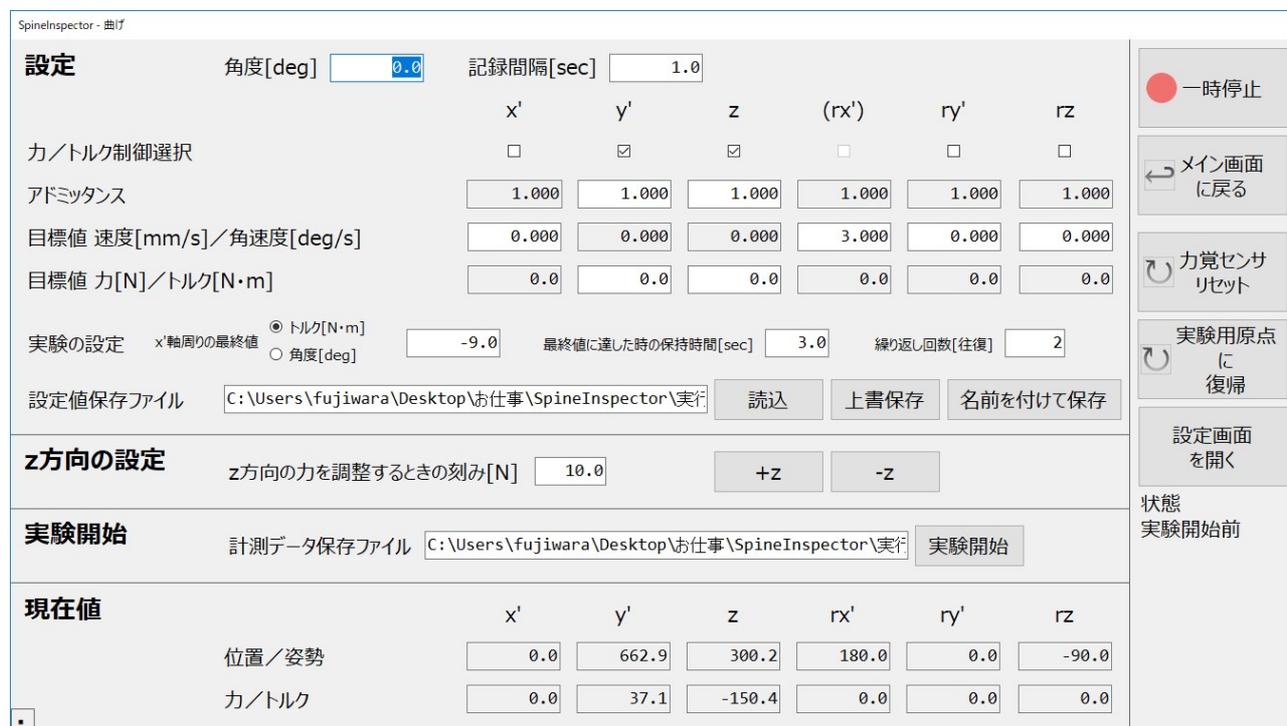


図 9 新型試験機の GUI(曲げ試験の画面)

向けの小型インプラントを安全に関与するためには、脊椎の ROM を適切に測定できる技術が不可

欠である。今後、次世代インプラントの国産品開発に資するように活用していきたい。

謝辞

本報告の成果の一部は平成 29 年度ものづくり中小企業・小規模事業者連携支援事業のプロジェクト「みえ医療機器コンソーシアムによる次世代脊椎インプラントの開発」によるものです。みえ医療機器コンソーシアムのメンバー企業であり、様々な工夫を凝らして新型脊椎試験機のハードウェアを製作していただいた株式会社シリックスに謝意を申し上げます。また、様々な工夫を盛り込みソフトウェアを製作していただいた株式会社三鈴エリーに謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 藤原基芳ほか：“脊椎の力学的特性を測定するための 6 軸材料試験機の開発”。平成 16 年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告, 29, p41-46 (2005)
- 2) 藤原基芳ほか：“6 軸材料試験機の力制御”。平成 16 年度三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告, 29, p47-52 (2005)
- 3) 藤原基芳ほか：“脊椎の力学的特性を測定するための 6 軸材料試験機の開発 (第 2 報) - 試験機の改良とイノシン腰椎を用いた実験 -”。平成 17 年度三重県科学技術振興センター工業研

究部研究報告, 30, p35-41 (2006)

- 4) 茂木万梨子ほか：“6 軸材料試験機を用いた脊椎変形挙動の実験的解明 (第 1 報, 脊椎強度測定用試験機の開発)”。日本機械学会論文集 A 編, 74, 740, p621-627 (2008)
- 5) 稲葉忠司ほか：“6 軸材料試験機を用いた脊椎変形挙動の実験的解明 (第 2 報, 片側 PS 固定術の脊椎固定性に関する力学的評価)”。日本機械学会論文集 A 編, 76, 770, p1373-1378 (2010)
- 6) 増田峰知ほか：“脊椎強度評価試験機により得られた医学的成果と今後の展開”。ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2016, 1A2-02a6 (2016)
- 7) W. Augustus et al.: "Clinical Biomechanics of the Spine". Lippincott., p85-125 (1990)
- 8) 森 英治ほか：“腰椎変性すべり症に対する pedicle screw 併用後側方固定術の長期成績”。臨整外 40, p791-798 (2005)

(本研究は, 法人県民税の超過課税を財源としています。)