リアルタイムコントローラーを用いた
新型関節力学試験ロボットシステムの開発木村 圭^{*1}, 藤江 裕道^{*2}Development of a novel robotic system for joint mechanical tests
using a real-time controllerKei KIMURA^{*1} and Hiromichi FUJIE^{*2}^{*1, *2} Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191-0065, Japan

Received 17 December 2014

Abstract

Application of robotic systems to the field of joint biomechanics studies has been performing in the last 2 decades. While a variety of studies have employed commercially available articulated robots we have designed and developed a material testing machine-like 6-degree of freedom (DOF) robotic system for higher load capacity and accuracy. The previous system consists of serially linked 2 translational and 3 rotational axes and a translational axis. All the servomotors at the 6 axes are controlled by a PC through a high-speed motion network. In the present study, we developed a novel 6-DOF robotic system that has a decoupled mechanism consisting of serially linked 3 translational axes and serially linked 3 rotational axes. All the servomotors at the 6 axes are controlled by a real-time controller through the EtherNet and EtherCAT. With knee joints fixed to the robotic system, either force control or position control can be applied with respect to the 6-DOF knee joint coordinate system. The velocity-impedance control was modified and applied to the force control while the velocity control was applied to the position control. The clamp-to-clamp stiffness of the novel robotic system was 541-1027 N/m and 262-355 Nm/rad which are more than 1.5 times higher than those of previous system. Responses to a step-function force input and a ramp-function force input were faster and more precise in the novel system than in the previous system. Moreover, joint forces and moments during 2-DOF and 6-DOF joint loading tests were controlled more precisely in the novel system than in the previous system. These results indicate the superiority of the novel robotic system over previously developed robotic systems. We believe that, with the system, it is possible to simulate physiological situations of the knee joint such as slow gait, standing up from a chair, and so on.

Key words : Robotic system, Joint biomechanics test, Decoupled mechanism, Real time controller, Velocity impedance control

1. 緒 言

我々の膝関節は、膝関節を構成する大腿骨と脛骨の形状適合性が悪い。また、体幹から離れており、動特性を高めるため筋組織が少なく、軽量かつコンパクトに設計されている。そのため、膝関節の力学的安定性は靱帯と半月板に大きく依存している。膝関節の主要靱帯は前十字靱帯 (ACL : Anterior Cruciate Ligament), 後十字靱帯 (PCL : Posterior Cruciate Ligament), 内側側副靱帯 (MCL : Medial Collateral Ligament), 外側側副靱帯 (LCL : Lateral Collateral Ligament) の4つである。半月板には内側半月と外側半月の二つがあり、それぞれ大腿骨と脛骨間の形状適合性の悪さをカバーしている。これらの靱帯と半月板は個体が走行状態から急激に停止した時や、方向転換した時に大きな力を受ける。特に、ACL は大腿骨に対する脛骨の前方移動や内旋を拘束する機能を有しており (Butler, et al., 1980), スポーツ等では高荷重がはたらくため損傷頻度が高いことが知られている (Bruesch and

No.14-00684 [DOI:10.1299/transjsme.14-00684], J-STAGE Advance Publication date : 20 May, 2015

^{*1} 正員, 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)^{*2} 正員, フェロー, 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科

E-mail of corresponding author: fujie@tmu.ac.jp

Holzach, 1993). また、これらの靱帯と半月板は血行に乏しいため、損傷すると治癒が困難であるという問題がある。そのため、膝靱帯と半月板は整形外科における重要な治療対象とされ、両組織に関する生体力学的検討が数多く行われてきた。

Fujie らは、膝靱帯と半月板の力学機能を調べる際に、膝関節の多自由度機構を考慮した力学試験を行うために、産業用ロボットを試験機として用いた (Fujie, et al., 1989)。その後、多くの研究機関で産業用ロボットを力学試験装置に用いた多自由度力学試験が実施され、有益な結果が得られている (Fujie, et al., 1989, 1993; Ishibashi et al., 1997; Woo, et al., 1999; Mae, et al., 2001)。しかし、それらのロボットは多関節型であったため、剛性および位置分解能が低いという問題があった。そこで、Fujie らは、直動 3 軸と回転 3 軸からなる関節力学試験ロボットシステムを独自に開発し (Fujie, et al., 2004)、これらの問題解決を図った。さらに、関節を力制御で試験する際に荷重偏差を速度に変換し制御する速度インピーダンス制御の採用により、力制御の特性が改善された (以下、旧型システム) (Fujie and Yagi, 2011)。しかし、旧型システムの剛性は、直動自由度については $320 \sim 814 \text{ N/mm}$ 、回転自由度については $90 \sim 168 \text{ Nm/deg}$ 程度であり、高荷重の試験が困難であった。また、制御プログラムを PC の Windows 上で実行させていたため Windows の制約を受け、PC とアクチュエータ間の通信方式の制約も受けたため、荷重検出、通信、機構計算、通信、アクチュエータの動作の周期は 5 ms が限界であった (Fujie and Yagi, 2011)。そのため、実際の関節力学試験における動作速度は膝の直動自由度に関しては 1.0 mm/s 、回転軸に関しては 2.0 deg/s 程度と遅く、大腿骨に対する脛骨の前後方引き出し動作のような準静的動作のシミュレーションは可能でも、歩行などの比較的速い動作のシミュレーションは困難であった。さらに、ロボットの機構のうち、5 軸を直列に配置したため、試験関節周囲に空間的余裕がなく、実験的処置や計測等が制限されていた。

そこで本研究では、低速歩行などの運動時の膝主要靱帯等の力学機能について解析を行うことを目標に、前述した問題を解決するために、新型関節力学試験ロボットシステム (以下、新型システム) を開発することを目的とした。制御速度を高めるために制御プログラムをリアルタイムコントローラーで実行させる仕組みとした。また、ロボットの剛性を向上させるため、直動 3 軸と回転 3 軸を分離する位置姿勢分離機構を取り入れた。開発した新型システムを用いて、クランプ間の機械的剛性を求め、力制御の諸特性について検討を行った。

2. 関節力学ロボットシステム

2・1 膝関節座標系

本研究では、膝関節の機構を、大腿骨と脛骨に固定された大腿骨座標系 C_f と脛骨座標系 C_t の間を連結する膝関節座標系 C_k で表現する (図 1) (Grood and Suntay, 1983)。各自由度は、屈曲伸展 (Flexion-Extension, F-E)、内側外側 (Medial-Lateral, M-L)、内反外反 (Varus-Valgus, V-V)、前方後方 (Anterior-Posterior, A-P)、内旋外旋 (Internal-External, I-E)、近位遠位 (Proximal-Distal, P-D) である。本研究で開発するロボットシステムは、この関節座標系それぞれに対して位置制御または力制御を行うことが可能な多自由度力学試験システムである。

2・2 ロボット本体

旧型システムは、直動 1 軸以外の 5 軸がロボット上部からつり下げられる構造であった (図 2 (左)) (Fujie and Yagi, 2011)。直動 3 軸は、AC サーボモーター (表 1) にボールねじ機構 (THK, 日本) を接続して駆動する。回転 3 軸は、減速機とサーボモーターが一体化された AC サーボアクチュエータ (表 1) により駆動する。これに対し、新型システムは回転 3 軸と直動 3 軸を分離した位置姿勢分離機構を採用することで、軽量、コンパクト化を図った (図 2 (右))。直動 3 軸は、AC サーボモーター (表 1) にボールねじ機構 (THK, 日本) を接続して駆動させ、回転 3 軸はいずれも減速比 160 のハーモニックドライブ減速機 (ハーモニックドライブシステムズ, 日本) を接続し、駆動させた。荷重とモーメントの検出には 6 軸力センサ (ATI Industrial Automation, USA) を用い、マルチファンクション DAQ (National Instruments, USA) を通してリアルタイムコントローラー (National Instruments, USA) に入力することとした。制御 PC (Windows 8, Dell, USA) とリアルタイムコントローラー、AC サーボシステム (山洋電気, 日本) を EtherNet と EtherCAT で制御 PC に接続した。旧型システムと新型システムの重量と大きさを表 2 に示す。

Fig. 1 Knee joint coordinate system (C_k) consisting of Flexion-Extension (F-E), Medial-Lateral (M-L), Varus-Valgus (V-V), Anterior-Posterior (A-P), Internal-External (I-E) and Proximal-Distal (P-D) degrees of freedom from the femoral coordinate system (C_f) to the tibial coordinate system (C_t).

Fig. 2 Mechanism of the novel robot system (right) as compared with the previous robot system (left). The novel system consists of 3 serially connected translation axes and 3 serially connected rotation axes, while the previous system consists of 5 serially connected translation and rotation axes and a translation axis.

Table 1 Specification of servo-motor used for translation and rotation axes in the previous and novel robotic systems

	Translation			
	Previous system			Novel system
	X axis	Y axis	Z axis	X, Y, Z axis
Company	Yaskawa Electric	Yaskawa Electric	Yaskawa Electric	Sanyo Denki
Instantaneous maximum torque [Nm]	0.955	0.955	1.43	2.2
Resolution [μm]	0.061035	0.061035	0.027743	0.030517

	Rotation			
	Previous system			Novel system
	U axis	V axis	W axis	U, V, W axis
Company	Harmonic Drive Systems	Harmonic Drive Systems	Harmonic Drive Systems	Sanyo Denki
Instantaneous maximum torque [Nm]	260 (Including gear)	260 (Including gear)	64 (Including gear)	2.2 (Excluding gear)
Resolution [deg]	0.000274658	0.000274658	0.000274658	0.00008583

Table 2 Comparison of size and weight of the novel and previous robotic systems

	Previous system	Novel system
Weight [kg]	700 + 100 (Excluding control device + control device)	500 (Including control device)
Width [mm] $\times$ depth [mm] $\times$ height [mm]	1340 $\times$ 810 $\times$ 1775, 600 $\times$ 600 $\times$ 1000 (Excluding control device, control device)	1200 $\times$ 800 $\times$ 1510 (Including control device)

2・3 システム構成

旧型システムでは、制御プログラムを PC 上の Windows で実行させ、PC とアクチュエータ間のデータ通信にメカトロリンク (Mechatrolink II, 安川電機, 日本) が用いられていた (図 3)。新型システムでは、Windows 上で LabVIEW (LabVIEW2013 real-time module, National Instruments, USA) を起動させ、プログラムを作成、設定し、これをリアルタイムコントローラーに EtherNet を通じて転送して実行させることとした (図 4)。コントローラーとアクチュエータのデータ通信には EtherCAT を用いた。ハードウェアのスペックによれば制御周期を約 1 ms まで向上させることが可能である。

2・4 制御方法

関節の各自由度に関して、平林らによって提唱された速度インピーダンス制御 (仮想コンプライアンス制御) (平林他, 1986) を応用した力制御系を構成した。制御対象である関節の各自由度の慣性, 剛性, 粘性を M , K , C として運動方程式 (1) を立て、これを離散化し弾性項を無視した式 (2) を用いて力制御する仕組みとした (Fujie and Yagi, 2011)。

$$M\ddot{x} = F - Kx - C\dot{x} \quad (1)$$

$$v' = \Delta t M^{-1} F + (I - \Delta t M^{-1} C) v \quad (2)$$

ここで、 F は膝関節座標系 C_k に作用する力/モーメントであり、6軸力センサの出力 F_s に、関節の変位を変数とするヤコビアン J_1 (Fujie, et al., 1996) をかけることで求められる。 Δt は制御周期、 I は単位行列を表す。式(2)より、 C_k において F を生じさせるのに必要な Δt 秒後の速度 v' を、現在の速度 v から計算する。速度 v' をヤコビアン J_2 (Fujie and Yagi, 2011) でロボット座標系における速度 V に変換し、直動3軸(X, Y, Z)と回転3軸(U, V, W)を速度制御する仕組みとした(図5)。式(2)における M と v の係数である速度参照率 $R (= I - \Delta t M^{-1} C)$ を変化させることで制御特性を調整した。

位置制御を行う関節自由度に関しては、指定された目標位置と現在位置との差を速度に変換し、これをロボット座標系に変換して速度制御する仕組みとした。

Fig. 3 System configuration diagram of the previous robotic system. Control program runs on the PC and data were transferred through mechatrolink II to the 6 axes of the robot.

Fig. 4 System configuration diagram of the novel system. Control program runs on the real time controller and data were transferred through EtherCAT to the 6 axes of the robot.

Fig. 5 Data transfer of the velocity-impedance control for force control in the novel robotic system. The velocity vector v' at C_k calculated using equation (2) was transformed to the velocity vector V with respect to the robot using a Jacobean J_2 . Six axes of the robot were driven at a velocity of V .

3. 特性評価試験

新型システムおよび旧型システムの2台のロボットシステムを用いて、以下の評価試験を行った。

3・1 クランプ間剛性試験

ロボットのクランプ間の剛性を検討するため、Fujie の手法 (Fujie, et al., 2004) を参考に、ロボットに試験時の姿勢をとらせ、大腿骨クランプと脛骨クランプ間に変形を無視できる鋼製の棒を固定した。この状態は大腿骨軸 (図1の C_f の Y 軸) と脛骨軸 (図1の C_t の Y 軸) が一直線になる状態である。この状態で、6自由度の各方向に微小な変位を与えたときの同方向の荷重出力を6軸力センサの出力から読み取った。このときの試験自由度の微小変位は位置制御で与え、他の自由度は変位を拘束した。荷重/変位を各自由度のクランプ間剛性として求めた。

3・2 ステップ関数状荷重入力に対する応答

膝の荷重を制御する際にもっとも鋭敏な反応を示す近遠位自由度 (膝関節を圧縮する方向) に着目し、試験関節の圧縮力を 50 N まで一気に高めるステップ関数状入力に対する応答性について検討した。ブタ膝関節を 45° 屈曲位に固定し、屈曲伸展自由度と近遠位自由度以外の他の4自由度を無荷重状態の位置で固定し、近遠位自由度

にステップ関数状の圧縮力 50 N に到達するように入力値を与え、その後、圧縮力 50 N を保つように力制御した。力制御パラメータである慣性 M および速度参照率速度 R を調整し、ステップ関数状荷重に対する応答性を検討するとともに、安定した応答を示す力制御パラメータを特定した。この際、安定応答は荷重のオーバーシュートが 5%以内で、最も速く荷重目標値に達した応答とした。

3・3 ランプ関数状荷重入力に対する応答

ブタ膝関節を 45°屈曲位にて固定し、圧縮力を 0 N から 50 N まで 50 N/s の速さで徐々に高めるランプ関数状荷重入力に対する応答性について検討した。屈曲伸展自由度と近遠位自由度以外の他の 4 自由度は無荷重状態の位置で固定し、近遠位自由度に、1 s で圧縮力 50 N に到達するように線形的に入力値を高めるような力制御を行った。力制御パラメータは、ステップ関数状荷重入力に対する応答で得られた安定応答パラメータに設定した。

3・4 2 自由度試験（摩擦試験）

ブタ膝関節を用いて、45°屈曲位において圧縮力 50 N を負荷しながら、試験速度 0.5 mm/s で 2 mm 前後方に摩擦させる 2 自由度試験を行った。屈曲伸展、前後方および近遠位自由度以外の他の 3 自由度は無荷重状態の位置で固定した。近遠位自由度は 50 N を保つように力制御し、前後方自由度は一定速度 (0.5 mm/s) で速度制御した。近遠位自由度の力制御パラメータは、ステップ関数状荷重入力に対する応答で得られた安定応答パラメータに設定した。

3・5 6 自由度試験（前後方試験）

ブタ膝関節を 45°屈曲位に固定し、前後方力 50 N が負荷されるまで移動させる前後方負荷試験を行った。その際、前後方自由度は一定速度 (1.0 mm/s) で速度制御し、屈曲伸展、前後方自由度以外の 4 自由度は 0 N, 0 Nm が保たれるように力制御した。これら 4 自由度の力制御パラメータは、近位遠位自由度に対してはステップ関数状荷重入力に対する応答で求めた安定応答パラメータに設定し、内側外側自由度に対してはこの自由度方向の膝の緩みが大いことを考慮して、安定応答パラメータのうち、 M を 2 倍とし、 R は同値とした。回転自由度に関しては、6 自由度試験前に同様な動作を数回行い、力/モーメントの偏差の少ないパラメータとした。

4. 結 果

4・1 クランプ間剛性試験

膝関節伸展時を模擬したときの膝関節座標系の各自由度に関するクランプ間剛性の結果について表 3 に示す。新型システムでは、直動自由度は 540.6~1027.0 N/mm、回転自由度は 262.1~354.8 Nm/deg であった。旧型システムに比べて、新型システムでは、内側外側は約 2 倍、屈曲伸展および内外旋自由度は約 3 倍に剛性が向上した。

Table 3 Clamp-to-clamp stiffness of the each system

Translation [N/mm]	ML	AP	PD
Previous system	320.9	424.1	814.0
Novel system	613.3	540.6	1027.0
Rotation [Nm/deg]	FE	VV	IE
Previous system	90.5	168.2	125.3
Novel system	262.1	286.3	354.8

4・2 ステップ関数状荷重入力に対する応答

ステップ関数状荷重入力に対する応答の結果を図 6 に示す。旧型システムおよび新型システムともに速度参照率 R を一定にした場合、慣性 M が大きくなるにつれて応答が速くなった。しかし、点線の条件は反応が速いが、荷重出力が制御指令値 50 N の 48%も大きくオーバーシュートしている。安定応答は実線で示されており、その

条件は、旧型システムでは $R=25\%$ 、 $M=12\text{ kg}$ 、新型システムでは $R=50\%$ 、 $M=70\text{ kg}$ であった。圧縮力 50 N への到達時間は、それぞれ約 100 ms 、約 68 ms と新型ロボットの方が約 1.6 倍速いことがわかった。

Fig. 6 Response of proximal force output to a step-function input. The most stable response, defined as the fastest response within 5% of overshoot, is represented by black curves, while slower and faster responses are represented by dash-dotted and dotted curves, respectively.

4・3 ランプ関数状荷重入力に対する応答

ランプ関数状荷重入力に対する応答結果を図 7 に示す。旧型システムは制御開始から約 0.3 s までに最大約 6 N の誤差が生じ、その後も常に一定の誤差が生じていた。一方、新型システムは制御開始から約 0.5 s までに最大約 8 N の誤差が生じているものの、その後は入力された目標荷重に追従していた。

4・4 2 自由度試験（摩擦試験）

2 自由度試験における圧縮荷重制御の様子を図 8 に示す。旧型システムでは制御開始から約 0.7 s までに最大約 4 N の誤差が生じ、その後も一定の誤差が残存し、特に約 $3\sim 4\text{ s}$ では約 $2\sim 3\text{ N}$ の振動現象が観察された。一方、新型システムでは、制御開始から約 0.7 s までに最大約 2.5 N の誤差が生じたものの、その後は圧縮荷重が 50 N に保たれていることが確認された。

Fig. 7 Response of proximal force to a ramp-function input. Although errors are observed at the start of force control in both the systems, the force was precisely controlled after 0.5 s in the novel system while the error remained in the previous system.

Fig. 8 Temporal change of joint contact force during 2-DOF friction test. Force fluctuation remained in the previous system while it was almost negligible in the novel system.

4・5 6 自由度試験（前後方試験）

前後方試験中の6自由度の力を図9に示す。旧型システムでは、前後方移動中において内側外側および近位遠位自由度荷重は約 ± 4.0 Nの誤差が常に残存していた。また、前後方移動速度を1.0 mm/s以上にした場合、力制御が追いつかず、振動、発散現象が見られた。一方、新型システムでは、前後方荷重が ± 50 Nで変動する間、内側外側および近位遠位自由度荷重誤差は約 ± 2.0 N以内とほぼ0 Nが保たれた。前後方移動速度を旧型システムの限界である1.0 mm/sの2倍である2.0 mm/sとしても、前後方移動中において内側外側および近位遠位自由度荷重は約 ± 3.0 Nの誤差は見られたものの振動、発散現象は見られず、試験を行うことが可能であった。

Fig. 9 Temporal change of 3-DOF joint forces during the anterior translation test up to ± 50 N. F_{ml} and F_{pd} were controlled to zero in the novel robotic system while they fluctuated within ± 4.0 N in the previous system.

5. 考 察

新型システムでは、位置姿勢分離機構の採用により、制御装置をシステム本体に一体化させたにも関わらず約25%の小型化が実現され、試験関節周囲の作業スペースの確保が実現された。また、33%の軽量化を実現することができた。さらに、膝関節座標系における剛性が直動自由度は540.6~1027.0 N/mm、回転自由度は262.1~354.8 Nm/degであり、旧型システムに比べ、直動自由度に関しては約1.5~2.0倍、回転自由度に関しては約2.0~3.0倍程度剛性が向上した。これらの結果より、試験中における膝関節の様子をあらゆる角度から詳細に検討しながら、より高荷重負荷条件での関節力学試験が実施可能となった。また、リアルタイムコントローラーを用いることにより、試験中の制御ループ内の情報伝達が制御PCを介さず、Windowsによる制御プログラム実行の制約も受けなため、荷重検出、通信、機構計算、通信、動作の一連の制御周期を1 msまで高めることが可能となった。

ステップ関数状荷重入力に対する応答試験では、同様に調整された旧型システムと新型システムの制御速度について、新型システムの方が旧型システムより約1.6倍速かった。同試験機で異なる試料の試験を行った際に、各試験で同様な結果が得られることを確認していることから、試料による顕著な個体差はないと考えられる。よって、両システムで同じ制御手法を用いていることから、この速度向上は制御周期が速くなったことに起因する

と考えられる。現在、新型システムにおける制御周期は安全性を考慮して約 2.5 ms に設定しているが、プログラムの改良によりさらに速めることが可能であり、それに伴い制御速度もさらに速めることが可能であると考えられる。

ランプ関数状荷重入力に対する応答試験, 2 自由度試験, 6 自由度試験のすべてにおいて, 試験中の荷重制御について, 旧型システムに比べて新型システムの方が安定した力制御を実施することができた。また, 旧型では制御しきれなかった速度 1.0 mm/s 以上での前後方試験を新型システムでは実施することが可能となった。しかし, ランプ関数状荷重入力に対する応答および 2 自由度試験において, 制御開始から 0.5 ~ 0.7 s くらいまでに最大約 8 N および約 2.5 N の誤差が生じていた。これは, 現行の制御には速度インピーダンス制御のみが適応されているが, PI 制御を複合させることで改善されると考えられる。本研究では, 直動自由度の 1 つである圧縮自由度に対してステップ関数状荷重入力に対する応答を調べ, その条件を基に他の直動自由度の条件を決め, 回転自由度については 6 自由度試験の力/モーメントの安定度が高い条件に設定している。今後は各自由度ごとに力制御の安定条件を求め, より速く, より安定した制御条件を探りたいと考えている。

6. 結 言

新型関節力学試験ロボットシステムでは, 位置姿勢分離機構の採用により, 小型化, 試験関節周囲の作業スペースの確保, 軽量化, 高剛性化が実現された。また, リアルタイムコントローラーの使用により制御の高速化が実現され, 力制御の精度が向上した。新型システムは旧型システムに比べ, より高速かつ高荷重の関節力学試験が実施可能であると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり, 文部科学省科学研究費 (基盤研究 B : #25282134, 挑戦的萌芽研究 : #26560218), および首都大学東京全学傾斜研究費 (医工連携) の助成を受けた。また, ロボットシステムのハード, ソフトの設計, 製造にあたり (有) テクノロジーサービスの技術協力を受けた。

文 献

- Butler, D. L., Noyes, F. R. and Grood, E. S., Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee, *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 62-A, No. 2 (1980), pp. 259-270.
- Bruesch, M. and Holzach, P., Epidemiology, treatment and follow-up of acute ligamentous knee injuries in alpine skiing, *Z Unfallchir Versicherungsmed*, supplement, No. 1 (1993), pp. 144-155.
- Fujie, H., Livesay, G.A., Fujita, M. and Woo, S. L-Y., Forces and moments in six-DOF at the human knee joint: mathematical description for control, *Journal of Biomechanics*, Vol. 29, No. 12 (1996), pp. 1577-1585.
- Fujie, H., Mabuchi, K., Tsukamoto, Y., Yamamoto, M. and Sasada, T., Application of robotics to palpation of injury of ligaments - Development of a new method of knee instability test-, *Proceedings of the ASME, Tissue Engineering*, BED-14 (1989), pp. 119-121.
- Fujie, H., Mabuchi, K., Woo, S. L-Y., Livesay G.A., Arai, S. and Tsukamoto, Y., The use of robotics technology to study human joint kinematics: a new methodology, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 115 (1993), pp. 211-217.
- Fujie, H., Sekito, T. and Orita, A., A novel robotic system for joint biomechanical tests: Application to the Human Knee Joint, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 126 (2004), pp. 54-61.
- Fujie, H. and Yagi, H., Novel robotic system for joint biomechanical tests using velocity-impedance control, *Transactions of the ASME, abstract of Summer Bioengineering Conference*, No. 53884 (2011), pp. 651-652.
- Grood, E.S. and Suntay, W. J., A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 105 (1983), pp. 136-144.

- 平林久明, 杉本浩一, 荒井信一, 坂上志之, 他自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 3 (1986), pp. 343-350.
- Ishibashi, Y., Rudy, T. W., Livesay, G. A., Stone, J. D. and Woo, S. L-Y., The effect of anterior cruciate ligament graft fixation site at the tibia on knee stability: evaluation using a robotic testing system, *Arthroscopy*, Vol. 13, No. 2 (1997), pp. 177-182.
- Mae, T., Shino, K., Miyama, T., Shinjo, H., Ochi, T., Yoshikawa, H. and Fujie, H., Single- versus two-femoral socket anterior cruciate ligament reconstruction technique: analysis using a robotic simulator, *Arthroscopy*, Vol. 17, No. 7 (2001), pp. 708-716.
- Woo, S. L-Y., Debski, R.E., Wong, E.K., Yagi, M. and Tarinelli, D., Use of robotic technology for diathrodial joint research, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol. 2, No. 4 (1999), pp. 283- 297.

References

- Butler, D. L., Noyes, F. R. and Grood, E. S., Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee, *Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 62-A, No. 2 (1980), pp. 259-270.
- Bruesch, M. and Holzach, P., Epidemiology, treatment and follow-up of acute ligamentous knee injuries in alpine skiing, *Z Unfallchir Versicherungsmed*, supplement, No. 1 (1993), pp. 144-155.
- Fujie, H., Livesay, G.A., Fujita, M. and Woo, S. L-Y., Forces and moments in six-DOF at the human knee joint: mathematical description for control, *Journal of Biomechanics*, Vol. 29, No. 12 (1996), pp. 1577-1585.
- Fujie, H., Mabuchi, K., Tsukamoto, Y., Yamamoto, M. and Sasada, T., Application of robotics to palpation of injury of ligaments - Development of a new method of knee instability test-, *Proceedings of the ASME, Tissue Engineering, BED-14* (1989), pp. 119-121.
- Fujie, H., Mabuchi, K., Woo, S. L-Y., Livesay G.A., Arai, S. and Tsukamoto, Y., The use of robotics technology to study human joint kinematics: a new methodology, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 115 (1993), pp. 211-217.
- Fujie, H., Sekito, T. and Orita, A., A novel robotic system for joint biomechanical tests: Application to the Human Knee Joint, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 126 (2004), pp. 54-61.
- Fujie, H. and Yagi, H., Novel robotic system for joint biomechanical tests using velocity-impedance control, *Transactions of the ASME, abstract of Summer Bioengineering Conference*, No. 53884 (2011), pp. 651-652.
- Grood, E.S. and Suntay, W. J., A joint coordinate system for the clinical description of three-dimensional motions: application to the knee, *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 105 (1983), pp. 136-144.
- Hirabayashi, H., Sugimoto, K., Arai, S. and Sakaue, S., Virtual compliance control of multiple degree of freedom robot, *Transactions of the SICE*, Vol. 22, No. 3 (1986), pp. 343-350 (in Japanese).
- Ishibashi, Y., Rudy, T. W., Livesay, G. A., Stone, J. D. and Woo, S. L-Y., The effect of anterior cruciate ligament graft fixation site at the tibia on knee stability: evaluation using a robotic testing system, *Arthroscopy*, Vol. 13, No. 2 (1997), pp. 177-182.
- Mae, T., Shino, K., Miyama, T., Shinjo, H., Ochi, T., Yoshikawa, H. and Fujie, H., Single- versus two-femoral socket anterior cruciate ligament reconstruction technique: analysis using a robotic simulator, *Arthroscopy*, Vol. 17, No. 7 (2001), pp. 708-716.
- Woo, S. L-Y., Debski, R.E., Wong, E.K., Yagi, M. and Tarinelli, D., Use of robotic technology for diathrodial joint research, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol. 2, No. 4 (1999), pp. 283- 297.