

身体運動能力を視覚化する可操作性スコープの研究開発

代表研究者	田中 良幸	長崎大学	大学院工学研究科	准教授
共同研究者	青山 忠義	名古屋大学	大学院工学研究科	准教授
共同研究者	塩川 満久	広島国際大学	健康スポーツ学部	教授

1 はじめに

我が国の若年層の基礎体力は低下傾向にあり、中長期の国際的競技レベルの維持・向上に効果的なスポーツ科学に関する研究開発が、「スポーツ基本計画」の下で推奨されている [1].

現在のスポーツ科学に基づく一般的なトレーニング形態では、競技者がスキル向上を効率的に達成する上で、コーチが高度な専門知識と競技経験を基に考えたアドバイスは欠かせないものである。しかしながら、コーチの指導内容は目視と競技経験に基づいて主観的に行われることから、コーチ毎によって判断基準と指導内容に相違が生じやすくなる。そしてまた、指導内容に対する競技者の理解や捉え方によっては、安全なトレーニングを実施することが困難となる場合も生じやすくなるであろう。もし、コーチと同じようなスポーツ動作の解析評価をリアルタイムで可視的情報に変換して、競技者とコーチに視覚的にフィードバックする手段を提供することができれば、より科学的で効率的なトレーニングの実現に役立つものと考えられる。そのためには、少なくとも競技者とコーチには、直感的に把握して共有できる情報を提示する必要がある。

最近では VR (Virtual reality) ヘッドマウント・ディスプレイ等の ICT (Information and communications technology) 機器が普及したことで、VR システムを用いたスポーツ解析システムに関する研究開発が盛んであり、プロ野球選手向けのトレーニングシステムやゴルフのスイング確認システムなど、いくつかのスポーツ種目で用いられている [2][3]。しかしながら、飛距離や試技の成否を点数化して評価・提示することを主としており、競技動作を解析評価して運動スキル向上を目指すトレーニング支援は目的としていない。

一方、ロボット工学の分野では、多関節マニピュレータを初めとして、ロボット機器の可動部における力学的な特性を、楕円体指標を用いて定量的な解析評価を可能とする可操作性理論 [4][5] が活用されている。人間の身体構造も、マニピュレータと同様に、多関節リンク機構でモデル化することが一般的にされている。そこでこれまでに我々は、ダイナミックに変動するスポーツ時の身体動作を、バイオメカニクスの観点と合わせて、可操作性理論を用いて解析評価を行ってきた [6]。そして、ジュニア世代でも直感的に把握・理解できるように、安価なデプスセンサなどの ICT デバイスを組み合わせて、リアルタイムでスポーツ動作に対する可操作性楕円体を VR 空間に表示するための、可操作性スコープのプロトタイプ・システムを試作して実現可能であることを示した [7]。しかしながら、独自につなぎ合わせて構築した試作システムは動作が不安定であり、また提示するグラフィックスも初歩的なものに限られていた。

そこで本研究調査では、最新の VR テクノロジーを活用して、実用性にも配慮して可操作性スコープのプロトタイプを開発した [8][9]。そして、開発した可操作性スコープによるスポーツ・トレーニング支援に向けた競技動作として、槍投げと砲丸投げを取り上げ、可操作性理論に基づいて各動作で求められる運動能力に関するトレーニング指標を定義して動作解析実験を行った [10]。

以下、本報告書では、開発した可操作性スコープのシステム構成と、ゲームエンジン Unity を活用して作成したアプリケーション・ソフトウェアについて説明する。そして、健常者による基本動作テストを実施した結果に加えて、可操作性スコープの有用性とスポーツ・トレーニング支援に向けた可能性を検証した実験結果について述べる。

2 身体可操作性スコープ

2-1 システム構成

Fig. 1 は、本研究で開発した可操作性スコープのシステム概略である。可操作性スコープは、身体運動を測定するための Depth センサ (Microsoft, KINECTv2)、筋活動を測定するためのワイヤレス筋電センサ (追坂電子機器)、使用者に視覚情報をフィードバックするための VR-HMD (Head Mount Display) (HTC, VIVE Pro)

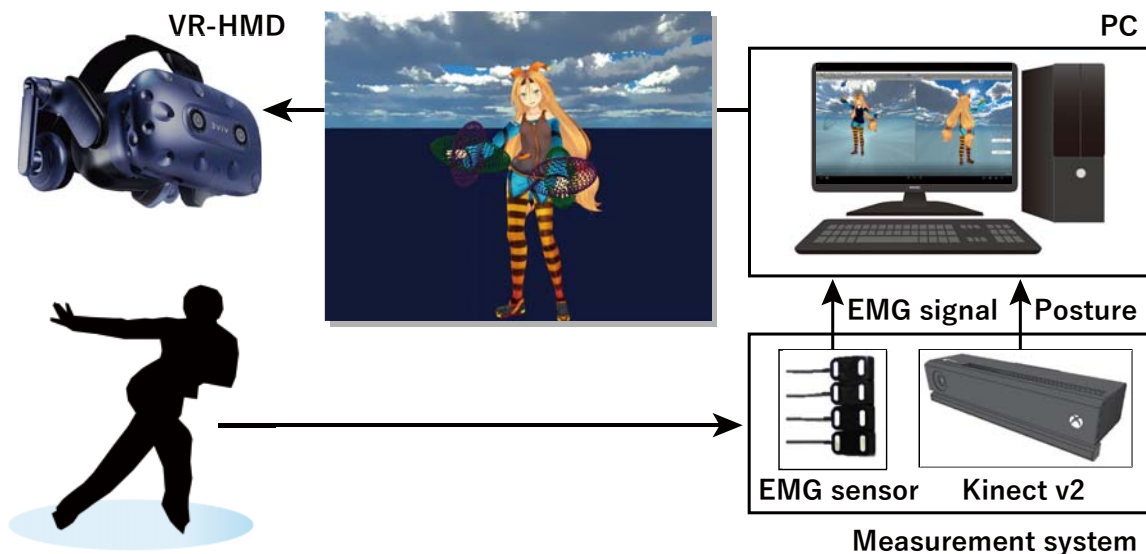


Fig. 1 VR システムを活用した可操作性スコープの概略図

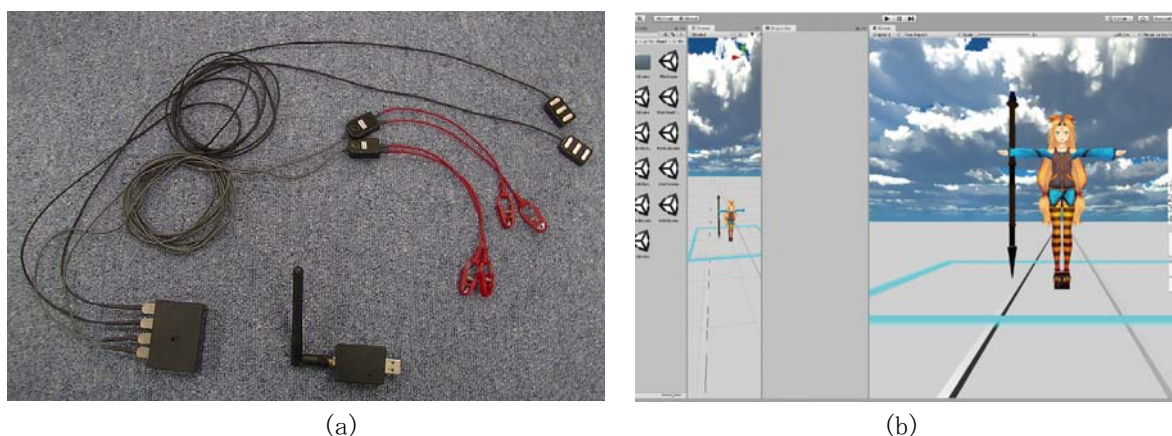


Fig. 2 Unity3D によるアプリケーション開発

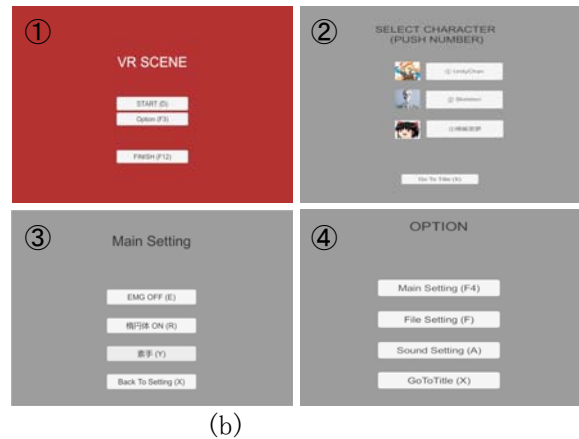
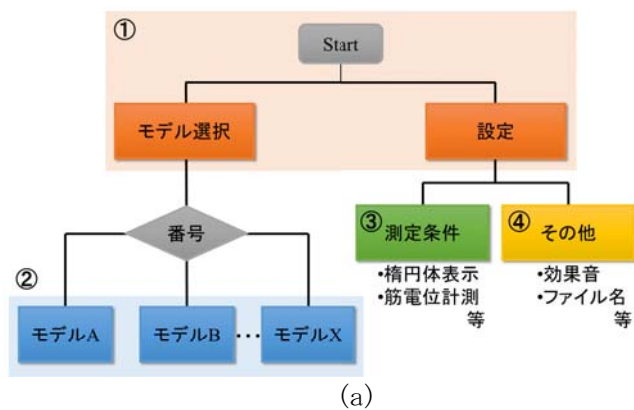
で構成されており、演算処理用の計算機に接続して使用する。

VR-HMD は、VR の技術を用いた表示装置の一種であり、頭に装着するゴーグルのような形をしたディスプレイである。被験者の視界すべてを映像で覆い、装着した被験者の頭の向きに合わせて映像も変わるという VR システムとなっている。このシステムを用いることで、被験者は臨場感を感じながら様々な仮想現実感を体験することができる。本研究調査では、VR-HMD と Unity を連動させて、ヒューマン・モデルと被験者の視線を一致させることも可能とした。

KINECTv2 は、環境に赤外線パターンを照射して、赤外線カメラで撮影された赤外線パターンの歪みから、環境の奥行情報を計算するセンサである。そして、この KINECTv2 は身体を木構造として認識し、全身の関節と頭部の三次元位置 (26 点) をリアルタイムで算出することができる。本システムでは、この関節位置から身体姿勢を取得するとともに、可操作性理論による解析評価を実行する。

ワイヤレス筋電センサは、身体の姿勢情報からでは把握できない、身体の動作における筋群の活動レベルを表す筋電位信号 (EMG) を測定するために使用する (Fig. 2(a) 参照)。本システムでは、同時に最大 4ch (4 つの筋) を測定できる仕様とした。

KINECTv2 とワイヤレス筋電センサで計測したデータは計算機に送信され、ゲームエンジン Unity3D で作成したアプリケーションで計算処理した結果が VR-HMD に映し出される (Fig. 2(b) および Fig. 3 参照)。Unity アプリケーションで用意したヒューマン・モデルは、KINECTv2 で計測した身体姿勢に連動し、手足先端には身体姿勢に応じた可操作性楕円体と操作力楕円体が表示される。また、筋活動レベルに応じて楕円体の色を変化させることも可能である。



(c)
Fig. 3 Unity アプリケーション・ソフトウェアの概略



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	-9.54E-07	-1.01688	0.56871	0.300934	0	0	0	0.134253	-0.21706	0	0.202327	-0.07948	0	0.418188	-0.05986	0	29242	29253	29260	29269	0.882711		
2	-9.54E-07	-1.01688	0.56871	0.300934	0	0	0	0.134253	-0.21706	0	0.202327	-0.07948	0	0.418188	-0.05986	0	29248	29257	29262	29264	0.882711		
3	-9.54E-07	-1.01688	0.56871	0.300934	0	0	0	0.134253	-0.21706	0	0.202327	-0.07948	0	0.418188	-0.05986	0	29244	29254	29274	29284	0.882711		
4	-9.54E-07	-1.01688	0.56871	0.300934	0	0	0	0.134253	-0.21706	0	0.202327	-0.07948	0	0.418188	-0.05986	0	29248	29253	29279	29284	0.882711		
5	-9.54E-07	-1.01688	0.56871	0.300934	0	0	0	0.134253	-0.21706	0	0.202327	-0.07948	0	0.418188	-0.05986	0	29246	29253	29282	29283	0.882711		
6	27.081	-1.01479	0.422483	0.312483	0	0	0	0.138896	-0.22379	0	0.17242	-0.11838	0	0.424843	-0.09029	0	29244	29258	29278	29283	0.892623		
7	27.081	-1.01479	0.422483	0.312483	0	0	0	0.138896	-0.22379	0	0.17242	-0.11838	0	0.424843	-0.09029	0	29242	29256	29282	29289	0.892623		
8	27.081	-1.01479	0.422483	0.312483	0	0	0	0.138896	-0.22379	0	0.17242	-0.11838	0	0.424843	-0.09029	0	29243	29250	29273	29282	0.892623		
9	27.081	-1.01479	0.422483	0.312483	0	0	0	0.138896	-0.22379	0	0.17242	-0.11838	0	0.424843	-0.09029	0	29243	29259	29282	29289	0.892623		
10	27.081	-1.01479	0.422483	0.312483	0	0	0	0.138896	-0.22379	0	0.17242	-0.11838	0	0.424843	-0.09029	0	29243	29258	29282	29289	0.892623		
11	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29242	29256	29276	29282	0.842083		
12	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29242	29253	29281	29286	0.842083		
13	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29244	29257	29280	29285	0.842083		
14	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29248	29259	29284	29289	0.842083		
15	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29246	29258	29284	29289	0.842083		
16	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29242	29258	29279	29284	0.744891		
17	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29243	29256	29281	29284	0.744891		
18	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29246	29256	29279	29284	0.744891		
19	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29243	29255	29284	29284	0.744891		
20	27.286	-0.98935	0.292324	0.221987	0	0	0	0.148875	-0.22989	0	0.202608	-0.15962	0	0.405371	-0.14142	0	29242	29253	29284	29284	0.7721		
21	27.586	-1.18877	0.482813	0.214674	0	0	0	0.138896	-0.22984	0	0.348908	-0.12238	0	0.408431	-0.10821	0	29242	29255	29284	29284	0.7721		
22	27.586	-1.18877	0.482813	0.214674	0	0	0	0.138896	-0.22984	0	0.348908	-0.12238	0	0.408431	-0.10821	0	29243	29253	29279	29289	0.7721		
23	27.586	-1.18877	0.482813	0.214674	0	0	0	0.138896	-0.22984	0	0.348908	-0.12238	0	0.408431	-0.10821	0	29243	29252	29280	29289	0.7721		
24	27.586	-1.18877	0.482813	0.214674	0	0	0	0.138896	-0.22984	0	0.348908	-0.12238	0	0.408431	-0.10821	0	29248	29256	29280	29289	0.7721		
25	27.586	-1.18877	0.482813	0.214674	0	0	0	0.138896	-0.22984	0	0.348908	-0.12238	0	0.408431	-0.10821	0	29248	29260	29282	29287	0.7721		
26	27.783	-0.85778	0.58893	0.098938	0	0	0	0.208142	-0.1898	0	0.423528	-0.03881	0	0.402531	-0.01174	0	29242	29254	29279	29288	1.489411		
27	27.783	-0.85778	0.58893	0.098938	0	0	0	0.208142	-0.1898	0	0.423528	-0.03881	0	0.402531	-0.01174	0	29248	29257	29282	29289	1.489411		
28	27.783	-0.85778	0.58893	0.098938	0	0	0	0.208142	-0.1898	0	0.423528	-0.03881	0	0.402531	-0.01174	0	29248	29258	29280	29288	1.489411		
29	27.783	-0.85778	0.58893	0.098938	0	0	0	0.208142	-0.1898	0	0.423528	-0.03881	0	0.402531	-0.01174	0	29247	29256	29278	29288	1.489411		

(a) (b)
Fig. 4 Unity アプリケーションにおける表示機能とデータ保存

2-2 Unity アプリケーション

Unity3D で開発したアプリケーションの概要を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) は Unity アプリケーションに実装した機能に関する概略図であり、Fig. 3(b) は Unity アプリケーションの主要な画面である。今回は Windows OS での使用を想定して開発したが、アプリケーションビルド時の設定によっては、他の OS でも使用することが可能である。

Unity アプリケーションを起動すると、まず初めに [VR SCENE] 画面が表示される。そして、[START] ボタンを選択すると [SELECT CHARACTER] 画面が表示され、好みに応じてヒューマン・モデル [11] を選択することができる。現時点では Fig. 3(c) に示している 3 種類ではあるが、新たに追加することが容易にできる。そして [OPTION] ボタンを選択すると、次のボタンが表示され、必要に応じた設定を行う。

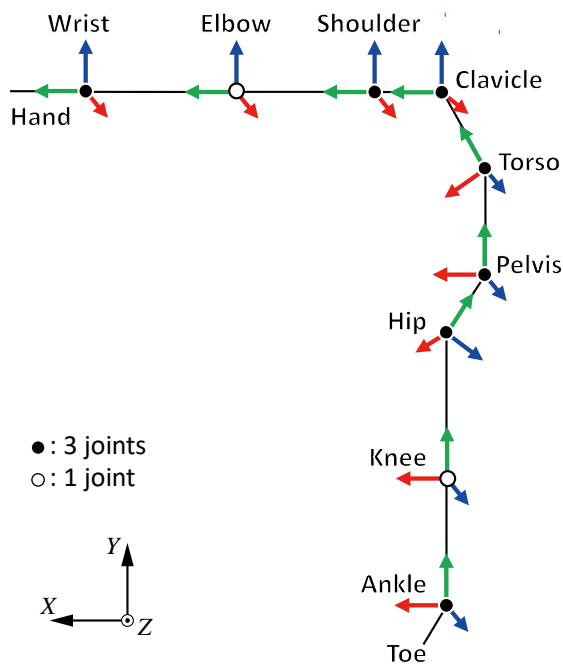


Fig. 5 ヒューマン・モデルに配置した回転関節

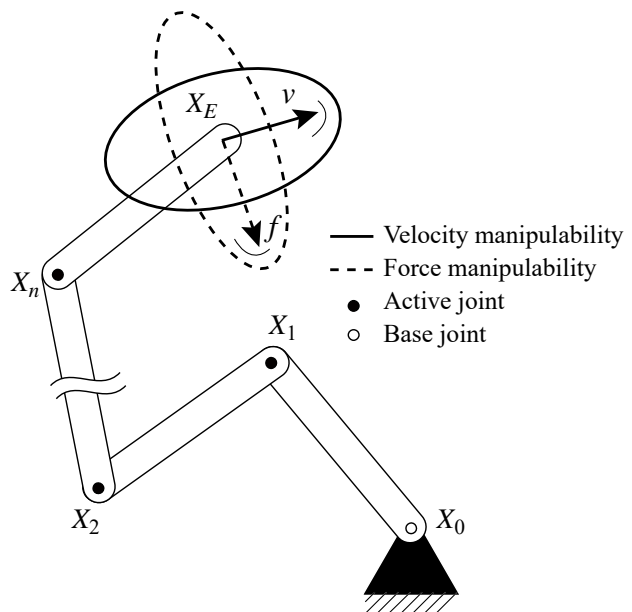


Fig. 6 多関節リンク機構と可操作性

- [Main Setting] : 楕円体表示と EMG 計測の有無を設定
- [File Setting] : 計測データと楕円体パラメータの記録の有無を設定
- [Sound Setting] : ヒューマン・モデルの発話 ON/OFF を設定

[Main Setting] ボタンを選択すると, [楕円体 ON/OFF] と [EMG ON/OFF] に加えて, [素手/やり投げ/砲丸投げ] の 3 ボタンが表示される. なお, 各ボタンをマウスでクリックすることで, 各種設定を切り替えることができるように作成した.

Fig. 4(a) は, 「楕円体の表示」と「EMG の計測」と「ヒューマン・モデルの発話」の機能を, 全て ON にした状態で計測した際の VR 画面の一例である. ここで, 画面内の数値は計測した EMG のデジタル値, 紫色の小球群は速度発揮能力に関する可操作性楕円体, 緑色の小球群は力発揮能力に関する操作力楕円体を表している (3-1 参照). なお, スイッチを押すことで, カメラ視点を切り替えて別画面を映すことも可能である.

Fig. 4(b) は, オンラインで計測・解析したデータをファイル出力した結果の一例である. KINECTv2 で測定した全身の関節の三次元位置座標, ワイヤレス筋電センサで測定した EMG のデジタル値, 各種楕円体パラメータ (形状・体積) など, オフライン解析でも活用できるデータを記録している.

2-3 ヒューマン・モデルの骨格と関節配置

Fig. 5 は, 可操作性を解析する上でヒューマン・モデルに配置した, 回転関節 (右半身) を示している. 上半身に関しては, 胸部と腰に 3 自由度の回転関節を配置し, 体幹と鎖骨の接合部, 肩関節, 手関節には 3 自由度, 肘関節には 1 自由度の回転関節を配置した. 下半身に関しては, 股関節と足関節に 3 自由度, 膝関節には 1 自由度の回転関節を配置した. つまり, 全身の自由度 (関節数) は, 計 40 となる. なお, 必要に応じて, 使用する関節を固定して自由度を下げることもできる.

各関節の角度は, 対象関節と前後の関節の 3 次元位置データを用いて各関節位置における座標系を設定し, 座標系間の回転行列から算出した. 右肘関節を例に挙げると, 肘を原点として手首と肩までの位置ベクトルをとり, それらの内積を用いて角度を算出する. 右肩関節を例に挙げると, 肩を原点として肘と手首の位置情報から二つのベクトルをとり, 肩-肘-手首で三角形を作る. 肩から肘までの単位ベクトルを座標系の X 軸, 三角形の法線方向の単位ベクトルを Z 軸とする. そして, 二つの単位ベクトルから Y 軸を決定する. このような計算処理を, 全身に配置した関節に対してリアルタイムで行い, それらの関節ベクトルを用いて可操作性解析を行う.

3 身体動作に対する可操作性

3-1 可操作性楕円体と操作力楕円体 [4][5]

ヒトの身体物理モデルは、ロボット・マニピュレータと同様に、Fig. 6 に示すような冗長性を有する多関節リンク機構で表現される。そこで本研究では、以下に述べるロボティクスで広く普及している可操作性理論を適用し、身体四肢先端における運動能力を可視化する。

Fig. 6 の多関節リンク機構の先端速度ベクトル $v \in \mathcal{R}^m$ は

$$v = [J]d\theta/dt$$

で与えられる。ここで、 $\theta \in \mathcal{R}^n$ は関節角度ベクトル、 $[J] \in \mathcal{R}^{m \times n}$ は関節角度変化に対する先端位置 X_E の変分を表すヤコビ行列であり、次式で算出できる。

$$[J] = [e_0 \times (X_E - X_0), e_1 \times (X_E - X_1), \dots, e_n \times (X_E - X_n)]$$

ただし、 $e_i \in \mathcal{R}^n$ は、第 i 関節の回転軸ベクトルである。そして、関節角速度に関する制約条件 $(d\theta/dt)^T(d\theta/dt) < 1$ において発揮可能な先端速度 v の集合は、

$$v^T [J^+(\theta)]^T [J^+(\theta)] v < 1$$

で定義される m 次元の可操作性楕円体となる。ここで、 $[J^+] \in \mathcal{R}^{n \times m}$ は $[J]$ の一般化擬似逆行列である。楕円体の長軸（短軸）は大きな速度を効率的に発揮しやすい（発揮し難い）方向を表しており、行列 $[J][J]^T$ の固有値 λ_i と固有ベクトル $V_i \in \mathcal{R}^m$ で決定される。

可操作性楕円体の主軸は、 $[J]$ を特異値分解して求められる。今、 $[J]$ の特異値分解を

$$[J] = [U][\Sigma][V]^T$$

とする。ただし、 $[U] = [U_1, U_2, \dots, U_m] \in \mathcal{R}^{m \times m}$ および $[V] = [V_1, V_2, \dots, V_n] \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は直行行列であり、 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$ である。なお、 σ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_m > 0$) は $[J]$ の特異値であり、 $[J]^T[J]$ の固有値 λ の平方根を大きいものから順に m 個とったものと一致する。 $[U]$ の第 i 列ベクトルを U_i で表せば、可操作性楕円体の主軸は $\sigma_1 U_1, \sigma_2 U_2, \dots, \sigma_m U_m$ で求められる。また、可操作性楕円体の体積は可操作性度 ω_v と呼ばれる定量的な評価指標として用いられ、

$$\omega_v = \{\det([J][J]^T)\}^{0.5}$$

で与えられる。

一方、多関節リンク機構の先端操作力 $f \in \mathcal{R}^m$ と関節トルク $\tau \in \mathcal{R}^n$ の関係は、次式で与えられる。

$$\tau = [J]^T f$$

そして、関節トルクに関する制約条件 $\tau^T \tau < 1$ において発揮可能な先端操作力 f の集合は、

$$f^T [J][J]^T f < 1$$

で定義される m 次元の操作力楕円体となり、その空間的形狀は可操作性楕円と直交関係となる。つまり、操作力楕円体の主軸は、 $U_m/\sigma_m, U_{m-1}/\sigma_{m-1}, \dots, U_1/\sigma_1$ で与えられる。

3-2 各種スポーツ動作への対応

実際の一般的なスポーツ競技では、競技者は腕や脚など特定の身体部位だけでなく、動作内容に応じて全身の姿勢と動作支点を変化させ、使用する身体部位をスムーズに切り替えている。またさらに、野球のバッティング動作など、競技種目によっては両手を組み合わせることも必要となってくる。そのようなスポーツ競技でみられる各種の身体動作に対して、本研究では身体動作に応じたヤコビ行列 $[J]$ の構成要素を、逐次更新することで対応させている。なお、開発した Unity アプリケーションでは、動作支点を Box 等で表示することも可能とした (Fig. 4(a) 参照)。

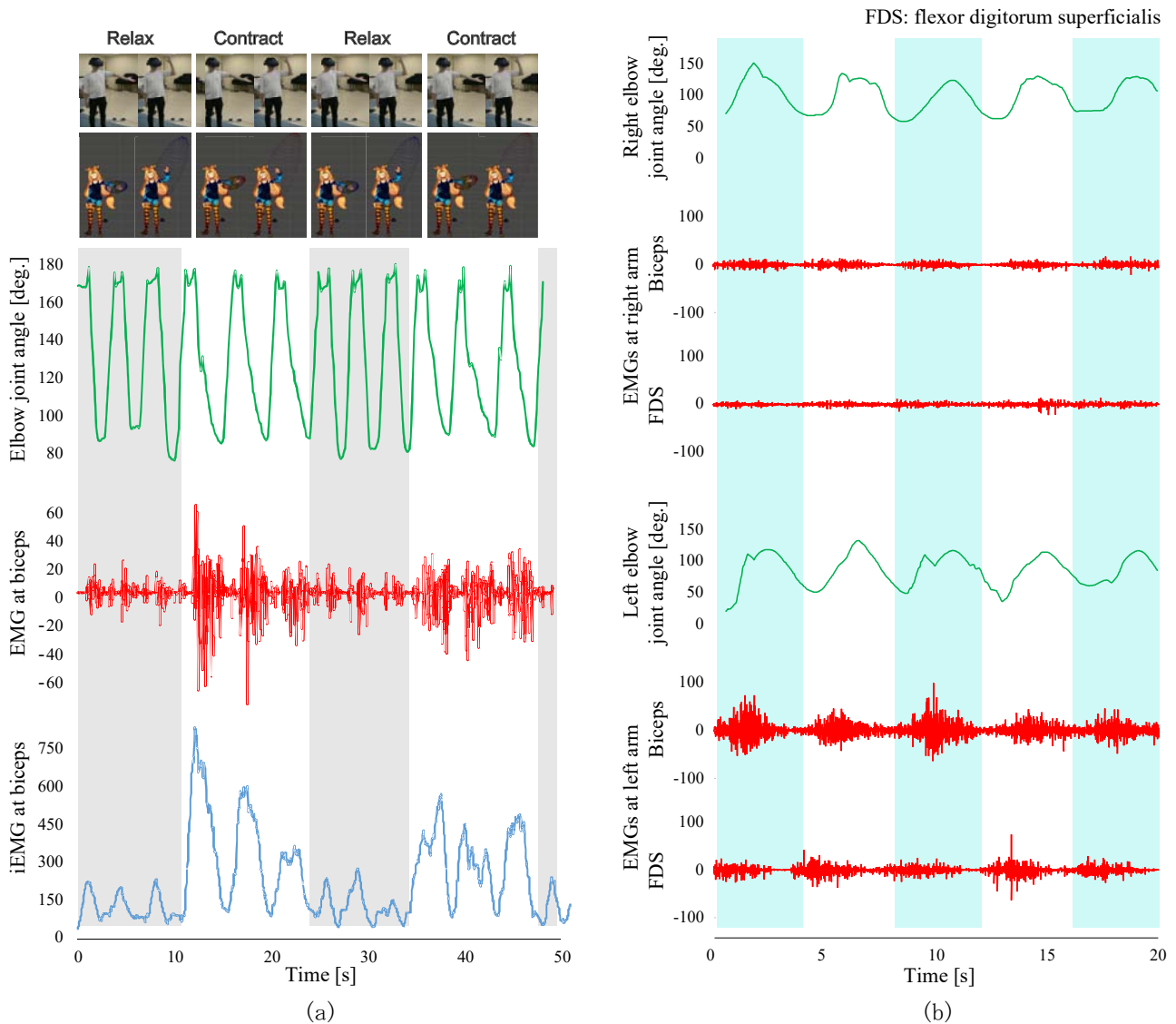


Fig. 7 肘関節動作と筋活動の同時計測の一例

4 可操作性スコープを用いた検証実験

4-1 基本動作における計測

本研究調査で開発した可操作性スコープの基本動作確認を、被験者 2 名で実施した。実験では、被験者を KINECTv2 に対して正面を向いて立たせ、上肢にワイヤレス筋電センサを張り付けて、床と水平に伸ばした状態から肘の角度を 90 度まで曲げた後、再び腕を水平に伸ばすように指示をした。そして、筋活動レベルを表す指標として多用される積分筋電位 iEMG は、積分区間を 1 秒と設定して次式で計算した。

$$iEMG(t) = \sum_{t-1}^t |EMG(t)|$$

Fig. 7(a) は、被験者 A に対して、左肘の関節運動においてリラックスした状態 (Relax) と、筋を共収縮させた状態 (Contract) を、交互に周期的に連続で実施させた際に計測した結果の一例である。なお、左腕の上腕二頭筋 (Biceps) に、ワイヤレス筋電センサ (1ch) を張り付けた。Fig. 7(a) より、関節角度が周期的に変化する一方で、筋収縮の状態に応じて筋電位信号と iEMG が増減していることがわかる。

Fig. 7(b) は、被験者 B に対して、左手に 2.5 kg のダンベルを持たせて負荷を与えた状態で、左右の肘関節運動を実施させた際に計測した結果の一例である。なお、両腕の上腕二頭筋 (Biceps) と握力に寄与する浅指屈筋 (FDS) に、ワイヤレス筋電センサ (計 4 ch) を張り付けた。Fig. 7(b) より、同じ動作であっても、

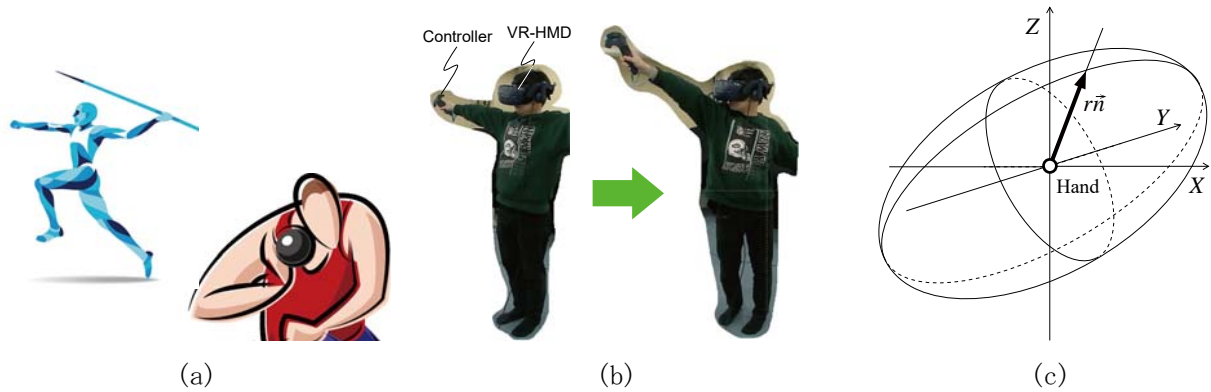


Fig. 8 解析動作における楕円半径 r を用いた初速度の決定

負荷をかけた左腕における筋活動レベルが高いことがわかる。

なお、使用する計算機の性能と、ワイヤレス筋電センサには 20 ms の遅延があるため、記録される関節角度と筋活動のデータ間には若干の時間的なズレが生じると考えられるが、本研究で対象とする比較的ゆっくりとした身体動作では十分と考える。以上の基本動作に対する計測実験を通じて、開発した可操作性スコープで、身体動作における姿勢と筋活動のオンライン計測機能が十分であることを実証した。

4-2 可操作性理論に基づくスポーツ動作評価

(1) 実験条件

スポーツ種目として、Fig. 8(a) の槍投げと砲丸投げの二種目を選定し、可操作性スコープの有無による効果を検証した。今回の実験では、被験者に KINECTv2 から約 2.2 m 離れた位置で VR-HMD を装着させ、右手にはコントローラを持たせた (Fig. 8(b) 参照)。なお、右手のコントローラのトリガースイッチを引くと、槍と砲丸が投げ出されるようにした。そして、各種目で要求される動作能力のトレーニング支援を考慮して、槍と砲丸が投げ出される時の初速度を、速度に関する可操作性楕円体と力に関する操作力楕円体を用いて、次のように設定した (Fig. 8(c) 参照)。

槍投げ動作：右肩・右肘・右手首の三点からなる平面の法線ベクトル n_1 を初速度の方向ベクトルとし、右手から法線ベクトル方向の可操作性楕円体の半径 r_1 を初速度の大きさとする。

砲丸投げ動作：右肘・右手首の二点で定まる単位ベクトル n_2 を初速度の方向ベクトルとし、右手から単位ベクトル方向の操作力楕円体の半径 r_2 を初速度の大きさとする。

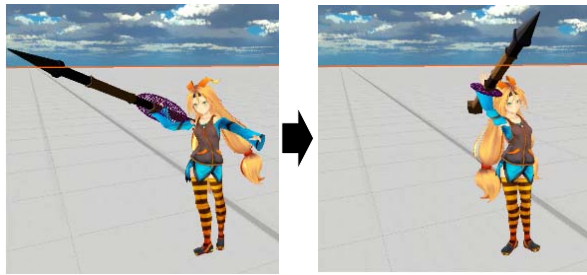
実験では、VR 空間に楕円体を表示しないで 2 試行を行わせた後、楕円体を表示した上で出来るだけ大きくするように教示をして 2 試行を行わせた。なお、動作支点は腰関節に固定して、可操作性解析を行った。以上の実験設定で、被験者 7 名 (男子大学生) で実施した。

(2) 実験結果

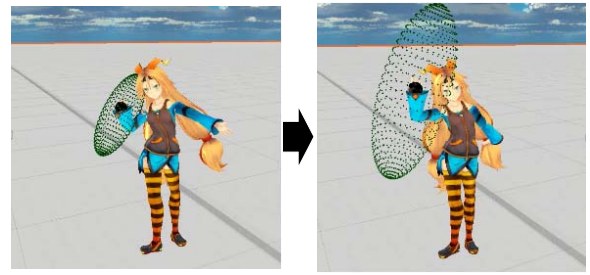
Fig. 9 と Fig. 10 に、槍投げと砲丸投げに対する実験結果を示す。Fig. 9(a) と Fig. 10(a) は、動作の開始時と終了時に VR 空間で表示されたヒューマン・モデルの一例である。なお、実験時に被験者に見せた VR 空間は、ヒューマン・モデルの視点から見える VR 空間としている。

Fig. 9(b) と Fig. 10(b) は、槍と砲丸を投げ出す付近における楕円体半径の時間変化の一例である。青色は VR 空間に楕円体を表示しない条件での結果、オレンジ色は表示した条件での結果である。なお、投げ出した時刻を 0 s とし、その際に計測された全身姿勢をスティックピクチャで示している。図より、VR 空間に楕円体を表示することで、被験者は楕円体半径が大きくなるような動作を選択して投げ出している様子がわかる。

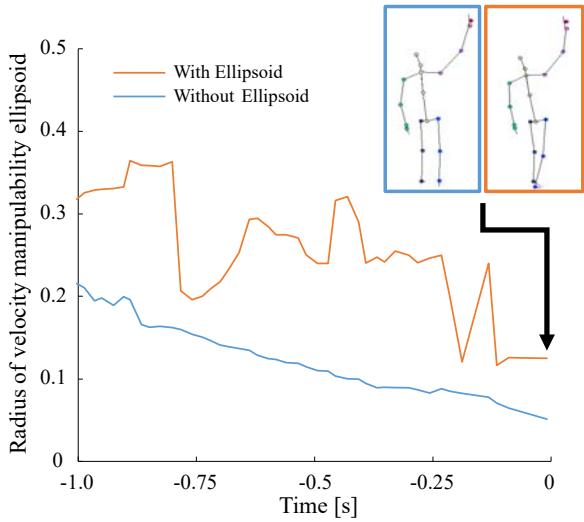
Fig. 9(c) と Fig. 10(c) は、投げ出された時の楕円体半径と槍および砲丸の飛距離の関係を、全被験者の平均値をプロットして示した結果である。槍投げと砲丸投げの両動作に対して、VR 空間中のヒューマン・モデルに楕円体を表示させることで初速度ベクトルが大きくなり、それに応じて飛距離が伸びる傾向にあることがわかる。



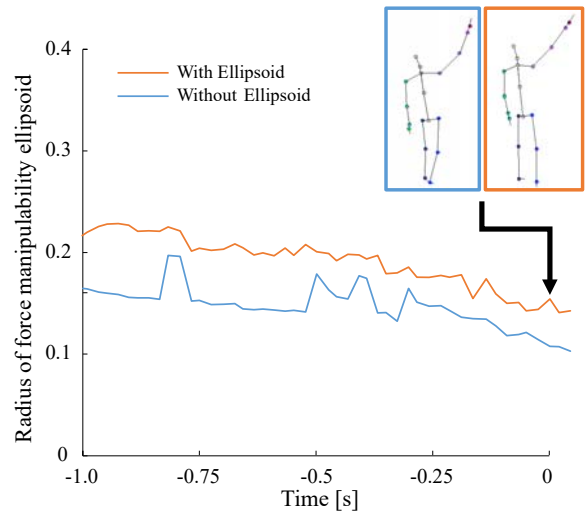
(a)



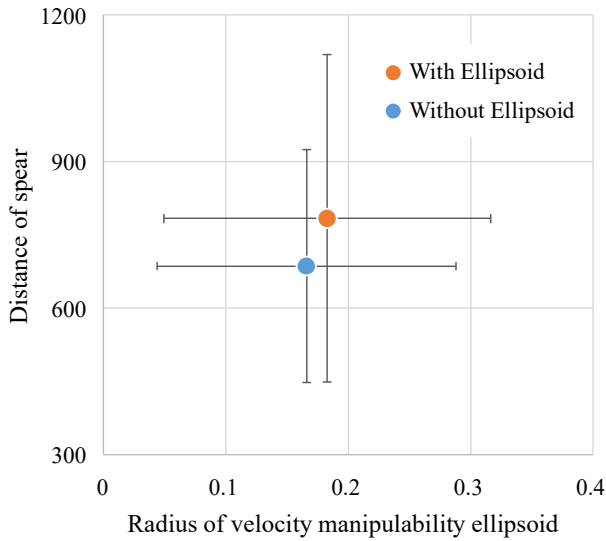
(a)



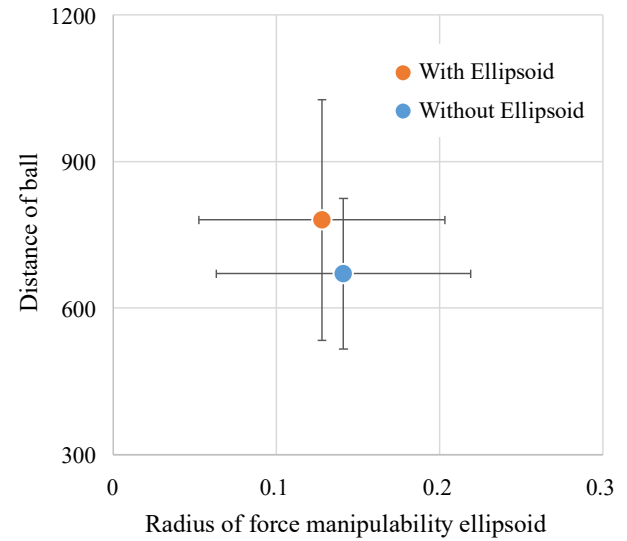
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 9 槍投げタスクにおける実験結果

Fig. 10 砲丸投げタスクにおける実験結果

今回は被験者数と試行数が十分ではないことから明確な有意差を確認することは出来なかったが、可操作性スコープを用いてVR空間内のヒューマン・モデルに楕円体を表示して使用者にフィードバックすることで、スポーツ動作のパフォーマンス向上に有用であることを確認した。

5 まとめと今後の計画

本研究では、Unity で作成したアプリケーションをプラットフォームとして、Depth センサと VR システムを用いて可操作性スコープを開発した。そして、槍投げと砲丸投げにおける動作を一例として取り上げ、可操作性理論に基づく動作解析実験を通じて有用性の検証を行った。今回は被験者数と試行数が十分ではないことから有意差までは示せなかったが、楕円体をリアルタイムで表示することで、使用者は楕円体を大きくする姿勢を選択することができるとともに、パフォーマンス向上につながる有効性を確認できた。また、可操作性のみで解析評価したが、もちろん、筋電センサを用いた動作解析も可能である。

今後は、対応するスポーツ競技種目および日常動作を増やししながら、実際にスポーツ講習会や地域交流会を開催して科学技術の啓蒙活動を実施したいと考えている。そしてさらに、工場ライン内における工員の疲労低減を目的とする作業姿勢のリアルタイム人間工学的評価や、より安心してパワーアシストを目的とするロボットスーツを含める医療福祉機器を実現するための評価・設計など、多方面に展開していく計画である。

【参考文献】

- [1] “スポーツ基本計画”, 文部科学省, http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/plan/
- [2] B. Bideau, R. Kulpa, N. Vignais, S. Brault, F. Multon, “Using Virtual Reality to Analyze Sports Performance,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 64-71, 2010.
- [3] H. C. Miles, S. R. Pop, et al., “A review of virtual environments for training in ball sports,” *Computers & Graphics*, Vol. 36, pp. 714-726, 2012.
- [4] T. Yoshikawa: “Manipulability of robotic mechanism,” *International Journal of Robotic Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 3-9, 1985.
- [5] 吉川 恒夫, “ロボット制御基礎論”, コロナ社, 1988.
- [6] Y. Tanaka, M. Shiokawa et al., “Manipulability analysis of kicking motion in soccer based on human physical properties, Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 68-73, 2006.
- [7] 相川 雄希, 青山 忠義, 塩川 満久, 田中 良幸: “可操作性理論に基づく共有型スポーツ動作解析システム”, 日本機械学会・ロボメカ部門学術講演会 2015, 1P2-H10, 2015.
- [8] 田中 良幸, 青山 忠義, 塩川 満久, “VR システムを用いた身体可操作性スコープの開発”, 日本機械学会・ロボメカ部門学術講演会 2019, 1A1-Q01, 2019.
- [9] 田中 良幸, 成清 舜也, 前田 真太郎, 青山 忠義, 塩川 満久, “身体可操作性スコープの開発と応用”, 計測自動制御学会・システム情報部門学術講演会 2019, SS05-05, 2019.
- [10] 田中 良幸, 成清 舜也, 前田 真太郎, 青山 忠義, 塩川 満久, “VRシステムを用いた身体可操作性スコープによる動作解析”, 日本機械学会・ロボメカ部門学術講演会 2020, 1A1-L01, 2020.
- [11] Unity Technologies Japan, “Unity-chan!,” <https://unity-chan.com/>

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
VR システムを用いた身体可操作性スコープの開発	日本機械学会・ロボメカ部門学術講演会 2019	2019 年 6 月
身体可操作性スコープの開発と応用	計測自動制御学会・システム情報部門学術講演会 2019	2019 年 11 月
VR システムを用いた身体可操作性スコープによる動作解析	日本機械学会・ロボメカ部門学術講演会 2020	2020 年 5 月