力覚提示機能を持つボールのドリブル仮想環境の構築

正会員 竹 田 仰[†], 筒 井 良 夫^{††}Construction of Virtual Environment with Force Display
for Ball DribblingTakashi Takeda[†] and Yoshio Tsutsui^{††}

Abstract We have developed a platform for training systems using virtual reality technologies, which are expected to be applicable in rehabilitation and the training for various sports. As a part of our research using the platform, we have implemented and installed the simulation capability of basketball dribbling, and begun a study on its effectiveness for training. The virtual reality system with force display we have developed can produce high force output allowing the control of the upper arm and forearm muscles. It is therefore able to simulate the comparatively large force needed for dribbling a rather heavy ball such as a basketball. This paper reports on the dependency of “the difficulty / easiness” of ball dribbling based on ball’s size, rebound coefficient, and gravity. Measurements were conducted using our virtual environment equipped with 3 D visuals, force, and haptic interfaces.

1. ま え が き

近年、コンピュータの飛躍的な進歩に伴い、人工現実感(以下、VRと略す)の技術を用いた応用研究が活発に行われている。VRとは、計算機によって作られる仮想空間に基づく視覚、聴覚、触覚などの感覚情報を、頭部や上肢、下肢の動きに応じて人間に提示することにより、人間があたかも仮想空間内に存在して行動しているかのような感覚を与える技術である。VRの応用分野は広範囲に及ぶが、特に福祉に関わる分野

において、我々はこの技術を上肢、下肢のリハビリテーションやスポーツトレーニング、さらには脳機能の診断や脳機能回復に応用したいと考え、開発検討してきた^{1)~5)}。しかし、この分野への応用例はまだ非常に少ない。吉澤ら⁶⁾は、頭部搭載型ディスプレイ(以下、HMDと略す)とCCDカメラにより頭部の動きに連動した視覚情報を改変してフィードバックすることにより、脳の運動制御機能が探れることを示している。しかし、上肢・下肢の関節の動きを検知し、これら関節を動かす筋肉に力の感覚を与える感覚提示装置(以下、

キーワード：人工現実感、力覚ディスプレイ、ボールドリブル、リハビリテーション、ゴム人工筋

1994年10月19日、計測自動制御学会第10回ヒューマン・インタフェース・シンポジウムで発表

1995年3月1日受付、1995年6月2日再受付

[†] 長崎総合科学大学 (〒851-01 長崎市網場町536, TEL 0958-39-3111)

^{††} 有人宇宙システム (〒105 東京都港区浜松町1-29-6, TEL 03-3436-0817)

[†] Nagasaki Institute of Applied Science (536, Aba-machi, Nagasaki 851-01, Japan)

^{††} Japan Manned Space Systems Corporation (1-29-6, Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo 105, Japan)

ディスプレイと呼ぶ)がないため、四肢のリハビリテーションや感覚・運動系の連結した機能検査が行えていない。また、岩田⁷⁾は、物体を把持し、力の感覚を得るために力覚ディスプレイを精密に製作しているが、指の制御が主体で上腕・前腕を制御するに足る大きな駆動力を持たない。大西⁸⁾は、テレイグジスタンスの目的からロボットのアームを動かし、力の感覚を得るバイラテラルなマニピュレータを開発しているが、危険な環境下でのロボットの作業が主体なため、上肢の早い動きにマニピュレータが追従しにくく、ディスプレイとしてみた場合、複雑となり大型化して持ち運び困難である。したがって、スポーツやリハビリテーションへの転用には無理がある。

我々は、仮想環境下での上肢、下肢のリハビリテーションやスポーツトレーニングが安全で携帯性に優れ手軽に行えるように、また、ヒトの筋力を制御するに足る駆動力を持ち、四肢の早い動きにも対処できるように、力覚ディスプレイの開発を中心にシステム構築を行ってきた。仮想環境下での機能訓練では、ボールやダンベルなどの用具が簡単に作り出すことができ、しかも大きさや重さといった物理定数を自由に変えることができる。また、それらの用具を使って、あたかも筋力トレーニングをしているような感覚を呼び起こしたり、単調訓練を克服するために仮想人物と腕相撲対戦を行う⁹⁾など、様々な新しい心理的、工学的な試みが期待できる。

本論文では、仮想環境下でのリハビリテーションの一例として、ボールのドリブルシミュレーションについて述べる。手を置くプレートにはボールに触れたことを提示する圧覚装置を製作し取り付けている。また、立体視のために電子回路を工夫し廉価で効率の良い映像装置も開発している。本システムでは、ボールの大きさ、重量、跳ね返り係数および重力の加速度などを自由に変えて、自分の体調に見合った訓練が行える。ボールが床や手に当たる音も提示される。また、ドリブルを上手に行うには視覚、聴覚および力覚などの感覚野と上肢の運動野との協調作業が必要であるが、本システムを利用すれば、ヒトの生体反応を観察し計測する新しい脳機能の診断や脳機能の回復訓練にも有効と思われる。

以下、2章ではシステムの構成に続き、仮想世界と立体視の得られる視覚サブシステム、音響効果のための聴覚サブシステムおよび力覚や圧覚の得られる力覚サブシステムについて説明する。3章では、ボールのドリブルのシミュレーションの方法について述べる。ついで実測とシミュレーションの比較を行い、実測を

よくシミュレーションしていることを示し、この方法に基づいて種々のパラメータを変えた場合の評価を行う。最後に4章として、まとめと今後の課題について述べる。

2. システム概要

2.1 システム構成

本システムを使ってバスケットボールのドリブルを行っている様子を写真1に示す。被験者はHMDをかぶり、上肢には力覚ディスプレイを装着する。周囲にはスピーカを配置してある。HMDには頭部の動きを計測するために非接触型の空間位置センサ(電子磁気コンパスと傾斜角センサの複合併用)を開発して搭載している¹⁰⁾。これは頭の動きに連動してコンピュータグラフィックス用ワークステーションにより、その方向に見える画像を作り出し、その空間を眺めているような気持ちにさせるのに必要である。力覚ディスプレイは仮想世界での種々の力を体験するために使われる。力覚ディスプレイの力を生成するために用いたアクチュエータは、空気圧式のゴム人工筋“ラバチュエータ”(ブリヂストン製、以下RUBと略す)で、安全、軽量および高出力の点から採用している。図1に本システムの構成を示す。システムは大別して3つの系に分けられる。ひとつは、仮想世界を提示するための視覚サブシステムでグラフィックスワークステーション“TITAN 2”(クボタコンピュータ製)、立体視のための3Dボード、NTSC変換器、HMDおよびフ

写真1 システム外観
External view of the system.

図1 システム構成図
Overall configuration of the system.

ットスイッチによって主に構成されている。次は、仮想空間内に発生する音の方向制御と種々の音響効果を生成する聴覚サブシステムで、MIDI インタフェース、サンブラ、エフェクタ、アンプそしてスピーカより構成されている。もうひとつは、力の感覚を与える力覚ディスプレイとその空気圧を制御する力覚サブシステムで、パーソナルコンピュータ“PC 9801”、DA 変換器、VC (電圧・電流) 変換器、圧力比例弁などから構成されている。力覚ディスプレイを操作すると、関節に取り付けたロータリエンコーダにより関節角度が TITAN 2 と PC 9801 にそれぞれ入力される。TITAN 2 では、その角度より仮想世界の中のモデル化された上肢の画像更新・生成を行う。また、PC 9801 では、その角度より RUB を制御するための 12 ビットのコードを出力する。コードは DA 変換器により 0~10 V の電圧に変換され、さらに VC 変換器で電流に変えられ、その電流で圧力比例弁を調整し、RUB の空気圧を変えている。

2.2 視覚サブシステム

仮想世界における上肢のモデリングのために、“Dore” と呼ばれるオブジェクト指向のグラフィックツールを使用した。ここで生成した上肢のモデリングは全部で約 2000 ポリゴンから成り、メッシュオブジェクトを用い、これにスムーズシェーディングを施し、なめらかな表現としている。上肢のモデリングは実際には、関節ごとに区切られたパーツ(ポリゴン)の集まりとして構成されている。これらパーツは、上腕

写真2 仮想世界におけるドリブルの様子
Dribbling in virtual environment.

から順番に親子関係になっている。したがって、ある関節を動かすとそこから下のパーツは連動して同じ方向に動くことになる。写真2に、仮想世界におけるバスケットボールのドリブルの様子を示す。次に、立体

図2 立体視のための回路図
Block diagram Three D generator.

視を得るための方法について述べる．両眼の視差を持つように配置した2つの“カメラ”をDore上で定義し、それらのカメラから見た2つの画像の各々の横方向の長さを1/2に縮小し、これら2つの画像を横方向に隣接して並べて1つの画像を構成する．TITAN2のコマンドにより、この1つに並べられた画像は低解像度の映像信号(RGB信号)として出力される．そこでこの画像を図2に示すように、ビデオ信号の水平同期信号に同期して走査しながら取り出し、取り出された1水平走査期間の信号を第1および第2の外部メモリーにAD変換器を通じて同時に書込む．第1のメモリーからは書き込み開始アドレスを読み出し開始アドレスとして、書き込み速度の1/2の速度でアドレスを進めながら読出し、元のアナログ信号に戻すためDA変換する．一方、第2のメモリーからは、書き込み開始アドレスから半分過ぎたメモリー領域の中央の位置を読み出し開始アドレスとして、書き込み速度の1/2の速度でアドレスを進めながら読出し、DA変換する．この後、第1および第2からDA変換された各々のRGB信号はマトリックス回路でビデオ信号となり、HMDの左右眼用の液晶パネルにそれぞれ出力される．仮想世界の横方向が1/2に縮小されていた映像はAD変換の速度に比してDA変換の速度が1/2なので、横方向が2倍に拡大され元の大きさに復元される．

2.3 聴覚サブシステム

聴覚における臨場感には、周囲への音場の広がり、音源の3次元空間における定位、音源の品質が重要である．我々のシステムでは、サンプラにあらかじめボールが床や手に当たる音データを採録しておく．これをエフェクタにより音源位置を決定し、デジタルミ

図3 力覚ディスプレイの構造
Structure of force display.

キサにより他の音源と合成し、さらにリバーブにより音場の広がりを持たせて出力している．仮想世界でボールが床や手に接触したと判定されると、TITAN2からPC 9801を経てMIDI インタフェースに音データが送られることになる．

2.4 力覚サブシステム

ボールをドリブルするための力覚ディスプレイの構造を図3に示す．このディスプレイを利用する際に、

図4 内圧をパラメータとした場合のバネ特性
 T versus θ characteristics, taking P as a parameter.

着脱を容易にして、かつ拘束感をすくなくするため、上腕をフレーム1のアームガイド2に、前腕をアームガイド1にあてがって、前腕をバンドでアームガイド1に固定する。手はアームガイド1の先に取り付けられたプレートの上に置く。そしてRUB1の端に付けたチェーンにより肘関節のスプロケットを回転させヒトの肘(JE)の屈曲・伸展を得る。

またRUB2とチェーンおよびスプロケットにより、RUB1を取り付けているフレーム1自体を回転させ、上腕骨長軸(JS4)の外旋・内旋を得る。図4に屈曲側のRUBの内圧 P をパラメータとした場合の変位角に対するトルク特性(バネ特性)を示す。バネのスティフネスはRUBの内圧を制御することにより簡単に変わることができ、図中の特性を線形とみなせば、大体16.2~4.0 Nm/rad程度変えられる。バネ定数 S (Nm/rad)をコンピュータから与える場合は図より

$$P=0.30S \quad (1)$$

なる内力 P (kgf/cm²)にRUBを設定すればよい。したがって、コンピュータの出力コード D_x と内圧 P との実測より求めた関係式より、

$$D_x=819P \quad (2)$$

なるコードをDA変換器に出力すればよい。この力覚ディスプレイでは手のひらを置くプレートの位置で最大23 kgf程度の、押し上げる力や押し下げる力を得ることができる(押し下げる場合は伸展側のRUBを同様に制御する)。ボールが手のひらに当たった判定をTITAN2よりPC9801が受け取ると(1)、(2)式により屈曲側のRUBの内圧を上げる。ボールを押し下げるときは、RUBの屈曲力に打ち勝ってデ

図5 圧覚装置部の外観図
 External view of haptic display.

図6 仮想世界での上肢の寸法設定
 Location of upper arm in the virtual environment.

イスプレイを下げることになる。力覚ディスプレイのJE軸のステップ応答は約0.06秒で始動し、0.1秒当たりおよそ90°の早さで回転する。

図5に、ボールが手に当たったときの圧覚を提示するための装置を示す。プレートの上にゴムシートを張り外周をアルミフレームでエアが漏れないように固定し、さらに手の大きさ程度の部位が空気圧によって膨らみやすいようにゴムシート内を別のアルミフレームで囲っている。ゴムシートの膨張収縮を敏速にするために収縮時には真空ポンプにより強制排気している。仮想世界の中での上肢と床の寸法関係は図6に示すように、横断軸JS1は20°、上腕骨長軸JS4は固

定とした。したがって、ボールと接触する手のひらの床からの高さ $h_y(\text{m})$ は次のようになる。

$$h_y = 0.92 - l_2 \cos(\theta + 20^\circ) \quad (3)$$

3. ボールのドリブルのシミュレーション

3.1 シミュレーションの方法

ある時刻における手のひらの速度を v_a 、ボールの速度を v_b とする。床からみて、上向きを正、下向きを負の符号とする。手のひらの速度 v_a は、被験者が装着した肘関節のセンサのサンプリングデータから算出する。ボールは最初、(4)式にしたがって運動しているとする。

$$h_x = v_{b0}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (4)$$

ただし、 h_x は床からのボールの高さ、 v_{b0} は床の位置におけるボールの上向き初速度。

以下、シミュレーションの方法を3つの場合に分けて説明する。

(1) ボールと手のひらの座標が一致し、 $v_a < v_b$ のとき

ボールと手のひらが衝突しているとする。衝突している間は、手のひらはボールから押されているか、あるいはボールを押しており、いずれにせよ手のひらは力を受けている。衝突の開始より、手のひらは衝撃の吸収が始まり、2つの速度差を定数倍した、

$$v_c = 0.8(v_b - v_a) \quad (5)$$

v_c なる速度が消失していくとする(係数の0.8は手のひらとボールの間の跳ね返り係数に相当し、この値のとき、シミュレーション上での視覚、力覚の試行実験において実際のドリブルに近いバウンドをする)。よって、衝突後のボールの速度 v_{b2} は、衝突寸前のボールの速度 v_{b1} より v_c を減じたものなので

$$v_{b2} = v_{b1} - v_c \quad (6)$$

この速度 v_{b2} でボールは動こうとする。このとき、手のひらの受ける力 f は、ボールの速度の変化 $v_{b1} - v_{b2}$ がサンプリング周期 Δt の間に起こったとして

$$f = m(v_{b1} - v_{b2}) / \Delta t \quad (7)$$

ただし、 m はボールの質量。

この力 f を力覚ディスプレイにフィードバックする。その後、再びサンプリング周期(0.155秒)ごとに v_a と v_b を比較し、衝突なら v_{b2} を v_b とおいて、(5)～(7)式を繰り返す。ちなみに、ボールが手のひらを上向きに押しているときに、手の力を下向きに強めてボールを押し下げるとする。この場合、 v_a は負となるので、(5)式における v_c は v_a が上向きのときに比べて、より大きな値となる。したがって(6)式より、

急速にボールの速度は減衰する。また、このとき(7)式より、手のひらの受ける力 f も大きい。

(2) ボールと手のひらの座標が一致し、 $v_a = v_b$ のとき

ボールと手のひらは接触しているとする。共に同じ速度で同じ方向に動くが、手のひらは力を受けていない。

(3) $v_a > v_b$ のとき

ボールは速度 v_b を持って手のひらを離れ

$$h_x = v_{b0}t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (8)$$

の物理法則にしたがって落下する。ボールが床に当たる寸前の速度を v_{b3} とすると、床に衝突した後の速度 v_{b4} との間には

$$v_{b4} = e \cdot v_{b3} \quad (9)$$

ただし、 e は跳ね返り係数。

この後は(4)式に戻り、 v_{b4} を v_{b0} とおいてドリブルを繰り返す。

なお、ボールと手の当たり判定にはボールの半径 r

図7 バスケットボールのドリブルの実測例
Example of actual basketball dribble.

図8 ドリブルのシミュレーション
Computer simulation of basketball dribble.

も考慮している．実際のバスケットボールを測定し， m には0.62 kg， r には0.1225 mの値を用いた． e には床からの跳ね返りを実測して0.82の値を用いた．

3.2 ドリブルの実測とシミュレーション

被験者に力覚ディスプレイを装着した状態（力のフィードバックなしの状態）で，実際にバスケットボールのドリブルをさせ，手のひらの動きについて測定した．図7に，手のひらの高さ h_y の時間経過の様子を示す．図中グラフの太くなっている箇所はボールが手

のひらに触っている期間を示している．図より，ボールを規則正しく突いているので手のひらの上下運動の周期がほぼ一定で，およそ0.7秒となっている．また，腕が下がり始めてボールに手が触れており，その接触時間は最小0.09秒から最大0.23秒程度で，平均0.15秒である．図8に，同じ被験者によるシミュレーション結果を示す．図より，ドリブルの繰り返し周期約0.7秒であり，ボールと手のひらが接触している時間も平均0.12秒とよく似ている．また，ボールと手のひらの接触位置関係についても似ている．

3.3 ドリブルについての評価

図9(a)，(b)は視覚ディスプレイをCRTとHMDに変えた場合のシミュレーション結果を表す．仮想世界においても実際にドリブルをするのに近い位置関係でボールを見ているため，HMDを用いた立体視の方が立体視のないCRTに比べて奥行き感を把握しやすい．このためドリブルが長続きしている．とくに初めてこのシステムを体験する被験者には両者の違いが顕著である．男子学生4人について調べたが同じ結果になった．同図(c)はHMDにさらに力覚が加わった場合で，(b)に比べボールの打点位置が一定しており，より安定である．なお，図中■印はプログラミング上の当たり判定サイクル期間内で，手のひらとボールが接触したことを示す．

(a) CRTによる立体視でない場合
 $g=9.8\text{m/s}^2$ ， $e=0.82$ ， $r=0.1225\text{m}$ ，
 音あり，力覚・圧覚なし

(b) HMDによる立体視の場合
 $g=9.8\text{m/s}^2$ ， $e=0.82$ ， $r=0.1225\text{m}$ ，
 音あり，力覚・圧覚なし

(c) 立体視に力覚を加えた場合

図9 立体視と力覚提示のシミュレーション

Computer simulation with Three D and force sense.
 (a) CRT only ($g=9.8\text{m/s}^2$ ， $e=0.82$ ， $r=0.1225\text{m}$ ，with auditory sense, without force and pressure sense),
 (b) three D by HMD ($g=9.8\text{m/s}^2$ ， $e=0.82$ ， $r=0.1225\text{m}$ ，with auditory sense, without force and pressure sense),
 (c) force display addition to HMD.

(a) ドリブルができない人の例

(b) g を徐々に増加した場合

図10 ドリブルを継続する方法例

Method to help the player continue the dribbling.
 (a) Example result where can't dribble well,
 (b) the case of gradual increase in gravity.

図 11 ドリブルの周期と運動量
The period and momentum of basketball dribble.

図 10(a)はこのシステムに対して初心者であるためドリブルが2~3回で失敗している例を示す。そこで、ドリブル回数 n ごとに

$$g = 3.8 + 0.8 \times n, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

の演算をして、 g 値を徐々に増加させ、ドリブルが持続した例を同図(b)に示す。図 11 は g は一定 ($g = 6.0$) であるが、前半はボールを下方へ押すとき、力を加えず楽にドリブルしている。このためボールの周期はゆっくりしている。後半は力を入れて下方に押している。このため周期は速くなっている。各位置における運動量を棒グラフにして示しているが、3~5 倍ほど運動量が異なっている。これから、ドリブルの周期はボールの運動量とも関係するので、運動量も合わせてグラフに表示した方が解析に有益である。

4. む す び

仮想環境下での上肢、下肢のリハビリテーションやスポーツトレーニングの行える VR システムを構築し、そのひとつの応用例として、ボールのドリブルシミュレーションについて述べた。HMD による立体視映像に、音響効果や力覚および圧覚を加えることにより現実感は少しずつ改良されている。特に球技を扱う場合は、立体視は重要な要素である。また、音響効果があることにより物体の衝突がわかり、視覚上判断しにくいボールの位置情報を補っている。ボールが手に接触し、上肢を動かす合図として、圧覚は重要である。また、力覚によりどの程度の力を加えればよいか判断がつく。初心者がドリブルを持続していくためには床との跳ね返り係数も大切な要因で、今回の実験からおおよそ 0.8 以上が望ましいことがわかった。いずれにせよ、トレーニングに VR の技術を持ち込むこと

により、物理定数を変えながら最適な動作分析をしたり、過酷な環境下での訓練を行ったり、異種の感覚情報を改変しながら提示して機能検査を行ったり、今まで困難であった新しい試みが可能であることがわかった。今後の課題として、力覚ディスプレイを改造し、手首の自由度を増やす必要がある。また、ドリブル中に物理定数を変えたが、このことからヒトが運動中にもつリズム感を故意に揺さぶることにより、動的な運動制御に対する安定指数のようなものを導きたい。

〔参 考 文 献〕

- 1) 竹田, 大石: “空気圧制御による上肢の装具開発とその利用法”, 信学技報, HC 92-35, pp. 63-70 (Sep. 1992)
- 2) 竹田, 高橋: “計測と訓練機能を有する下肢装具の開発”, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会 News and Report, 8, 4, pp. 375-380 (Aug. 1993)
- 3) T. Takeda, Y. Tsutsui: “Development of a Virtual Training Environment”, ASME Winter Annual Meeting, Haptic Interface, DSC49, pp. 1-10 (Dec. 1993)
- 4) 竹田: “人工現実感による上肢訓練および筋力計測システムの開発”, バイオメカニズム 12, pp. 265-279, 東大出版 (1994)
- 5) 竹田, 筒井, 佐藤, 久木元: “力覚ディスプレイによるバスケットボールのドリブルシミュレーション”, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会 News and Report, 9, 3, pp. 241-246 (May 1994)
- 6) 吉澤, 松本, 公文, 竹田: “人工現実感システムを用いた人間の姿勢制御系解析システムの開発”, 計測自動制御学会第 8 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 179-184 (Nov. 1993)
- 7) 岩田: “力感覚に対応した人工現実感-多次元力感覚帰還装置の開発”, 計測自動制御学会第 5 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 5-8 (Oct. 1989)
- 8) 大西, 大道: “実証機用多本指マニピュレータ作業システム”, 日本ロボット学会誌, 9, 5, pp. 88-97 (Oct. 1991)
- 9) 竹田, 筒井: “人工現実感による仮想人物モデルとの腕相撲の試み”, 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部会 News and Report, 8, 2, pp. 183-190 (May 1993)
- 10) 佐藤, 竹田, リム: “HMD のための空間位置センサの開発”, 平 6 春信学総全大, 1-504

たけだ 竹田 昭和 47 年, 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業。同年, 九州松下電器(株)開発研究所に入社。昭和 57 年, 長崎総合科学大学工学基礎センター助手, 昭和 61 年, 同大学工学部講師, 平成 3 年, 同助教授, 平成 7 年, 教授となり, 現在に至る。平成 3 年, 長崎大学大学院博士課程修了。人工現実感に関する研究に従事。工学博士。正会員。

つつい 筒井 昭和 51 年, 九州芸術工科大学芸術工学部音響設計学科卒業。ソフトウェアメーカーを経て, 平成 3 年, 有人宇宙システム(株)入社。ソフトウェア安全性, 信頼性関連業務に従事。現在, 同社主任技師。昭和 61 年より, 長崎総合科学大学非常勤講師。