

人間と接するロボット開発のための 没入型三次元動力学シミュレーション環境

大西 正輝[†] 小田島 正[†] 羅 志偉[†] 細江 繁幸^{††,‡}

An Immersion Type 3D Dynamic Simulation Environment
for Developing Human Interactive Robot Systems

Masaki ONISHI[†], Tadashi ODASHIMA[†], Zhiwei LUO[†], and Shigeyuki HOSOE^{††,‡}

あらまし 本論文では人間と接するロボットを設計・評価するための没入型三次元動力学シミュレーション環境を提案する。本シミュレーション環境は、三つの部分（Immersion type display 部，3D dynamic simulator 部，Motion capture 部）で構成されている。Immersion type display 部では、汎用コンピュータの並列処理によるバーチャルリアリティ技術を用いて被験者に視聴覚情報を提示する。また、3D dynamic simulator 部では、被験者に追従する仮想被験者と仮想ロボットとの力学的なインタラクションによって生じる動力学運動を実時間で計算する。更に、Motion capture 部では、人間の動作をキャプチャすることで多自由度の関節を有するロボットの動作の初期設計を行う。介護福祉の現場で活躍するロボットの実現を目指したシミュレーションとして、ロボットが人間を抱き上げることを想定した実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

キーワード ロボットシミュレータ，人間と接するロボット，没入型ディスプレイ，三次元動力学シミュレーション，モーションキャプチャ

1. ま え が き

近年、ロボットの知能化を目指した研究が盛んに行われており、工場などの規格化された生産現場だけではなく、街や家庭などの一般環境におけるロボットの応用が期待されている。工場などで活躍する産業用ロボットには動作精度や動作速度が重要視されるが、人間と接するロボットには対人親和性や安全性が重要視される。また、人間がロボットの形状や色などを見てどのように感じるかといった主観的な評価も重要である。このため、産業用ロボットと人間と接するロボットでは評価基準や設計・実験手法に違いが生じると考えられる。

日常的に人間と接するロボットを開発することを考

えた場合、当然のことながらロボットの設計・実験環境には人間を含むことになる。これまでに提案されている人間と接するロボットは、基本的に人間とロボットの間で大きな力のやり取りはなく、ぬいぐるみのように人間の手の中で動作するもの [1] や、全身を用いた身振りと言声合成を用いて人間とコミュニケーションを行うもの [2], [3] が主であった。人間と大きな力をやり取りするロボットの研究が行われなかった理由の一つとして、開発途中のロボットを用いて人間とロボットの間で大きな力の相互作用が生じるような実験を行う場合、人間が危険にさらされることが挙げられる。また、人間とロボットが接触する場合には、ロボットが転倒する可能性も高く、耐久性やコストの面から何度も実験を行うのは難しいと考えられる。

このような場合には、実験の代わりにシミュレーションを行うのが一般的な手法であり、ロボットの開発を前提としたシミュレータがいくつか提案されている。その代表的なものとして中村らによる OpenHRP [4] や Khatib らによる Dynamic Simulation [5] が挙げられる。OpenHRP [4] は動力学計算を行うサーバや

[†] 独立行政法人理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター，名古屋市

BMC Research Center, RIKEN, 2271-130 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya-shi, 463-0003 Japan

^{††} 名古屋大学大学院工学研究科，名古屋市

Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furocho, Chigusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

制御則を実行するサーバなど四つのサーバと一つのクライアントで構成されており、クライアントを操作することでリアルタイムでシミュレーションを行う分散オブジェクトシステムとなっている。また、Dynamic Simulation [5] は、ディスプレイを見ながら触覚型デバイスを使って仮想環境の物体に触れることができ、仮想環境の動力学と触覚型デバイスの接触力による動力学をリアルタイムで計算している。これ以外にも様々なロボットシミュレータが提案されているが[6], [7], これまでに提案されているシミュレータを用いて人間と接するロボットのシミュレーションを考えた場合、シミュレータ内にロボットと接触する人間をモデル化するのは難しく、モデル化できたとしてもその人間モデルを人間のように動作させるのは難しいと考えられる。また、従来のシミュレータでは、ディスプレイに映るロボットを見ても実際のロボットとは大きさが異なり、平面的でもあるため、ロボットの形状や色に關しての主観評価を得るのが難しいという問題もある。

人間と接するロボットの設計・評価にあたって生じる多くの問題を解決するために、本論文では没入型三次元動力学シミュレーション環境を提案する。本シミュレーション環境は、文献[8]にモーションキャプチャ機能を加えた構成になっており、モーションキャプチャにより取得した人間の動作をもとにした目標運動を行う原寸大のロボットをバーチャルリアリティ技術によって立体的に表示することで、被験者の主観的な評価が得られる。また、被験者の動作に追従する仮想被験者を介して、ロボットとの力学的なインタラクションを行うことで、シミュレータ内に人間モデルを構築し、これを動作させることの困難さを克服している。現状では、被験者に力覚を提示する装置が完成していないため、厳密な意味で人間とロボットの間で力のやり取りができていないわけではないが、被験者の動作をロボットの動作に反映させることができることから、人間と接するロボットの開発支援に有効であると考えられる。更に、汎用 PC を用いたシステム構築により、従来のスーパーコンピュータを用いたシステムに比べてコストを低く抑えることに成功した。

2. シミュレーション環境の概要

本論文で提案する没入型三次元動力学シミュレーション環境は、図1に示すように、大きく分けて三つの部分で構成されている。被験者に視聴覚情報を提示する Immersion type display 部、三次元動力学演算

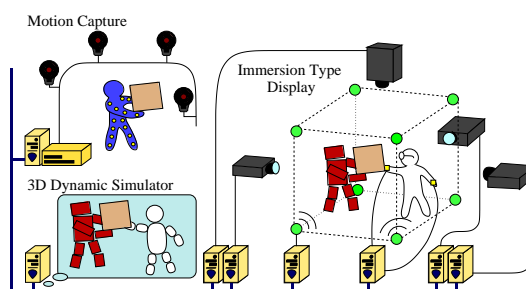


図1 提案システムの構成
Fig. 1 Setup of the proposed system.

を行う 3D dynamic simulator 部、モーションキャプチャを行う Motion capture 部である。これらのシステムは複数台の汎用 PC で構成されており、それぞれのコンピュータは TCP/IP で通信を行っている。

Immersion type display 部は、仮想ロボットと接する被験者に、バーチャルリアリティ技術を用いて視覚や聴覚などの情報を体感させる。視覚に関しては被験者の目の前に実際のロボットがあるような感覚を与える必要があり、聴覚に関してはロボットの足音や話し声などが実際に音の発生した位置から聞こえてくる必要がある。Immersion type display 部では、情報提示と同時に被験者の位置・姿勢測定も行う。ここで得られた測定結果は、リアルタイムで動力学演算を行う 3D dynamic simulator 部に送られる。

3D dynamic simulator 部は、入力された仮想ロボットの各関節角度を目標角度として、仮想ロボットの制御を行う。ここでは、人間と接するロボットのシミュレーションを考えているため、人間とロボットの衝突なども考慮する必要がある。そこで、目標角度をもとにして計算された制御入力と被験者に追従する仮想被験者から加えられた外力の相互作用として生じる動力学運動を実時間で求め、サンプリング周期ごとの各リンクの位置と姿勢を Immersion type display 部へ送る。

人間に違和感を感じさせないためには、ロボットは人間と類似する形状で人間と類似する動作を行うことが望ましいと考えられることから、ロボットの形状は人型とし、3D dynamic simulator 部のロボットの目標関節角度は、Motion capture 部によって得られた実際の人間の動作をもとに生成する。

以下、3., 4., 5. で Immersion type display 部, 3D dynamic simulator 部, Motion capture 部についてそれぞれ詳しく説明する。そして、6. では実験につい

て説明し, 7. で考察を行う. 最後に 8. でまとめる.

3. Immersion type display 部

被験者に実在感のある原寸大の仮想ロボットを体感させるのが Immersion type display 部である. 被験者に提示する情報はいくつか考えられるが, 今回は人間の感覚の中でも重要な役割を果たす視覚情報と聴覚情報を提示するシステムを構築した. また, Immersion type display 部では, 仮想被験者を制御するために, 被験者の身体に装着した磁気センサによって各部の位置・姿勢測定も行う.

3.1 視覚情報の提示

大型スクリーンで被験者を囲み, 立体映像を提示する映像表示装置に IPT (Immersive Projection Technology) がある. IPT は, 被験者を囲むように複数のスクリーンを配置し, プロジェクタによって映像を投影する技術で, 高い解像度と広い視野角によって被験者に高い没入感を与えることができる. IPT の代表的なものに 4 面 (前右左下面) をスクリーンで囲む CAVE [9] や, 5 面, 6 面をスクリーンで囲む CABIN [10], COSMOS などが提案されている.

従来の IPT 装置は, 高価なスーパーコンピュータを用いてシステムを構築していたため, コストが大きいという問題があった. それに対して, 本研究では複数台の PC/AT 互換機を用いた並列処理を行うことで比較的安価な 4 面スクリーンをもつ CAVE システムを構築した. 使用した PC の CPU は Intel 社の XEON 2GHz で 2GByte のメモリをもつ. また, ビデオカードには 3Dlabs 社の WildcatIII を使用しており, 2.4 [m] 四方のスクリーンに投影した映像を液晶シャッター眼鏡を通して見ることで立体視が可能になっている. PC/AT 互換機の計算能力は大型計算機に劣るが, 4 台のマシンで並列処理を行うことで表示遅れ等の問題への対処が可能であることは確認済みであり, PC の計算・描画能力の発展が期待されることや, 保守の容易さ, 費用対効果を考慮すると十分に耐えるシステムとなっている.

本研究では, PC で構成した CAVE (以下, PC-CAVE と呼ぶ) を用いて被験者に視覚情報を与えることで, 高い実在感を伴う仮想ロボットの映像を提供する.

3.2 聴覚情報の提示

聴覚情報の提示は Lake Technology 社製の Huron を用いて構成する. Huron は複数の音源をリアルタ

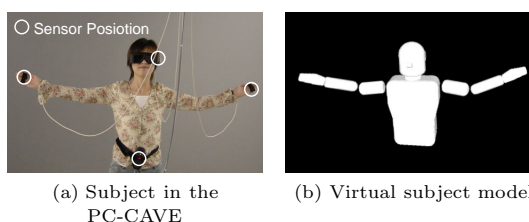


図 2 被験者と仮想被験者
Fig. 2 Subject and virtual subject.

イムでコントロールし, 擬似的な音空間を生成できるパースペクティブ技術である. 本研究では 8 台 (下の四隅と上の四隅) のスピーカで構成されたスピーカアレーを用いて様々な位置からの音を生成することで, 被験者に臨場感の高い音響効果を提供する.

ロボットから発せられる音の種類としては, 音声合成によって作り出したロボットの発話や, ロボットの足音・転倒音などの衝突音が挙げられる. また, Huron では室内での反響音なども計算によって再現することができる.

3.3 被験者の位置・姿勢測定

PC-CAVE 内の被験者の動作を仮想ロボットの動作に反映させるためには, 3D dynamic simulator 部に被験者の動きを伝える必要があるため, Immersion type display 部では被験者に情報提示を行うと同時に被験者の位置・姿勢を計測する. 正確なシミュレーションを行うためには, 被験者の詳細な位置・姿勢を計測することが望ましいが, センサ数の増加は計測システムの物理的・計算量的な大型化を招き, 被験者の受ける没入感を損うという問題を起こす. そのためここでは, 使用するセンサを位置と姿勢が計測可能な磁気センサ四つに限定して被験者を計測する.

PC-CAVE 内の被験者は, 図 2 (a) のように頭・両手首・腰に磁気センサを付ける. 頭につけたセンサによって目の位置を検出することで PC-CAVE に投影する視覚情報を更新し, 両手首と腰につけた三つのセンサを用いて両前腕と胸部の位置・姿勢を測定する. 磁気センサには Ascension Technology 社の Flock of Birds を用いており, 36 Hz で位置・姿勢を測定している. そして, これらの位置・姿勢測定結果は 3D dynamic simulator 部へと送信する.

4. 3D dynamic simulator 部

PC-CAVE 内の被験者をモデル化した仮想被験者と仮想ロボットの動力学を実時間で計算するのが 3D

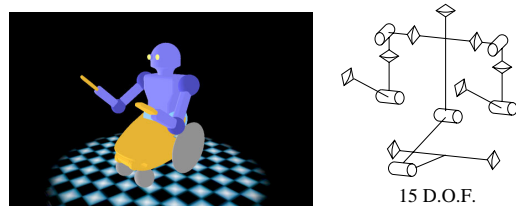


図 3 仮想ロボット
Fig. 3 Virtual robot.

dynamic simulator 部である。仮想被験者は 3.3 で測定した位置・姿勢結果をもとに制御され、仮想ロボットは Motion capture 部 (5. に後述) によって取得される関節角度を目標角度として制御される。3D dynamic simulator 部は Critical Mass Labs 社の Vortex を用いて開発した。Vortex は、リンク間の衝突干渉チェックを含めた動力学演算を高速に行うためのライブラリ群である。

4.1 仮想被験者の制御

仮想ロボットと被験者の力学的な相互作用を行うために、PC-CAVE 内の被験者をモデル化する。被験者はこの仮想被験者を介して仮想空間内の物体に力を加える。被験者とロボットのインタラクションは、被験者の上半身に限るものとして、胴部 (頭部を含む)・左右上腕・左右前腕の 5 リンクの人間モデル (図 2 (b)) を用意し、それぞれのリンクをボールソケットジョイントで連結した。より正確なシミュレーションを行うためには、人間と同じ自由度をもつモデルを構築し、これを被験者の各関節角度や関節トルクなどをもとに制御する必要があるが、3.3 で述べたように用いるセンサ数が限定されているため、ここでは胴部と前腕のみをセンサ情報をもとに制御する。つまり、仮想被験者の位置及び姿勢は、胴部と前腕の位置・姿勢を制御することで決定される。各部位は前述の被験者に取り付けられた対応する部位の磁気センサに追従するが、その制御則には PD 制御を用いている。また、上腕に関しては胴部と前腕との幾何的な拘束によってその位置と姿勢を計算している。なお、被験者の腕や胴などの長さは既知であるとしてパラメータとして入力する。

4.2 仮想ロボットの制御

日常的に人間と接するロボットは高い対人親和性を備えている必要があることから、その形状は人型かそれに類するものが適切であると考えられる。また、我々の研究の主眼がロボットの脚移動ではなく、人間との協調作業にあるため、移動系には比較的簡潔な車

輪を採用し、上半身を人型とした。その形状を図 3 に示す。この仮想ロボットは上肢に 10 自由度 (片腕で肩: 3, 肘: 1, 手首: 1)・首に 1 自由度・腰に 1 自由度・膝に相当する部位に 1 自由度と車輪移動による 2 自由度の合計 15 自由度をもつ。仮想ロボットの腕の長さや自由度は人間に近いものになるように配慮した。

将来使用を考えているアクチュエータの特性を考慮して仮想ロボットの関節の制御を行うことで、実機を製作する際のアクチュエータの選定支援が行える。更に、各関節のトルクや任意な場所にかかる力などの計測を行うことができ、また、カメラ位置を任意な点に設定できるため、実際のロボットでは計測が困難な情報なども容易に取得することができ、想定するロボットを多角的に評価することが可能となっている。これらのセンサ情報を用いた実験とその結果については 6. で述べる。

Motion capture 部で得られた人間の運動データを用いることで、仮想ロボットの目標角度は実際の人間の運動から生成できる。現在はロボットの各関節角度を速度制御方式によって制御している。また、動力学の演算と同時にシミュレーション内の仮想被験者を除いたすべての物体の位置・姿勢情報は、各物体の識別子とともに、TCP/IP で Immersion type display 部に送信される。

5. Motion capture 部

ロボットを設計する初期の段階では形状の詳細については未定である場合が多く、その段階ではロボットの動作アルゴリズムの考察及び検証を行うのが困難な場合がある。また、冗長自由度をもつロボットは動作の設計が難しいことから、設計の初期段階ではロボットの動作を人間の動きから取得することを想定し [11], [12], Motion capture 部を構築した。Motion capture 部は、PC-CAVE 内に実装することが望ましいが、PC-CAVE はスクリーンで囲まれているため、一般的には光学系のモーションキャプチャを行うのは難しい。また、PC-CAVE 内ではセンサ数は限られているが磁気センサによる簡易的なモーションキャプチャを行うことができるため、Motion capture 部では計測精度を優先し、PC-CAVE の外に光学系のモーションキャプチャを用意した。

人間の動きのキャプチャには Vicon Motion Systems 社の VICON を用いる。これは、6 台の赤外線カメラによって 120Hz のサンプリング周期で人間に付け

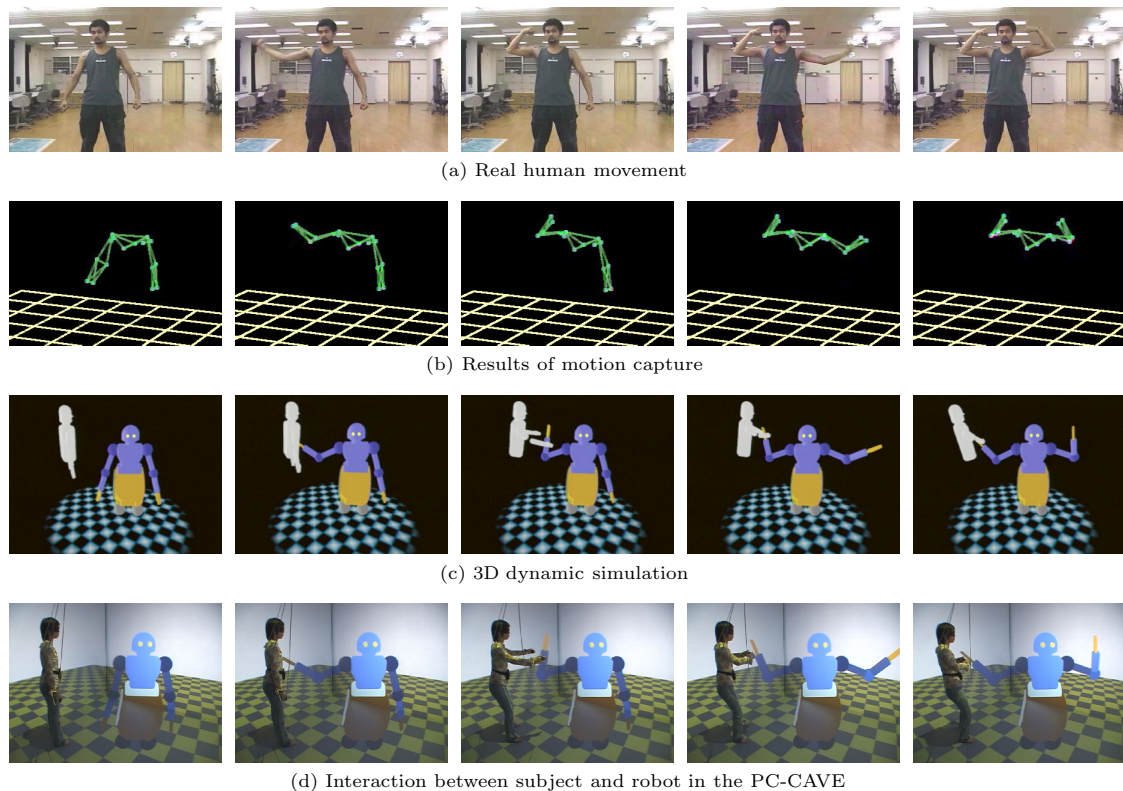


図 4 実験結果
Fig. 4 Experimental scene.

たマーカを観測し、その映像を統合することでマーカの三次元位置を復元する。マーカを人間の全身に付けることで、全身の動きをキャプチャすることができるが、今回想定している仮想ロボットは車輪で移動するため、キャプチャ領域は両腕及び胸部の動きのみに限定し、16 個のマーカで、肩の関節 3 自由度、肘の関節 1 自由度、手首の回転 1 自由度の計 10 自由度を測定した。Motion capture 部で測定した関節角度は仮想ロボットの目標関節角度として TCP/IP によって 3D dynamic simulator 部に送る。

現在、床反力計や筋電位、加速度情報なども同時に測定することで、運動中の人間の関節トルクの推定を計画している。これにより将来的には、タスクに応じた人間のトルク特性を解析することで得られた知見をもとに、タスク依存の最適運動生成を定量的に検証・考察することが可能となる。また、その結果を前述の仮想ロボットの制御に取り入れることで、生成された運動が被験者にどのような印象を与えるかという主観的な評価も可能となる。

6. 実 験

提案した没入型三次元動力学シミュレーション環境を用いた実験とその応用例について説明する。

6.1 ロボットとのインタラクション

図 4 に提案する没入型三次元動力学シミュレーション環境を用いた実験の様子を示す。(a) はマーカを付けた実際の人間の動きを表し、(b) は VICON を用いて計測したモーションキャプチャ結果を表す。(c) は 3D dynamic simulator 部によってリアルタイム計算された仮想被験者モデルと仮想ロボットの相互作用による動力学演算結果を表し、(d) は Immersion type display 部によって提示されたロボットの様子を表す。(c) の仮想ロボットは、モーションキャプチャによって目標関節角度が与えられており、図中左にいる仮想被験者モデルは (d) の被験者の動きに追従するように制御される。また、PC-CAVE では被験者がかける立体眼鏡の位置・姿勢（視線）に合わせた映像が投影されるため、(d) については立体眼鏡をカメラ位置に設

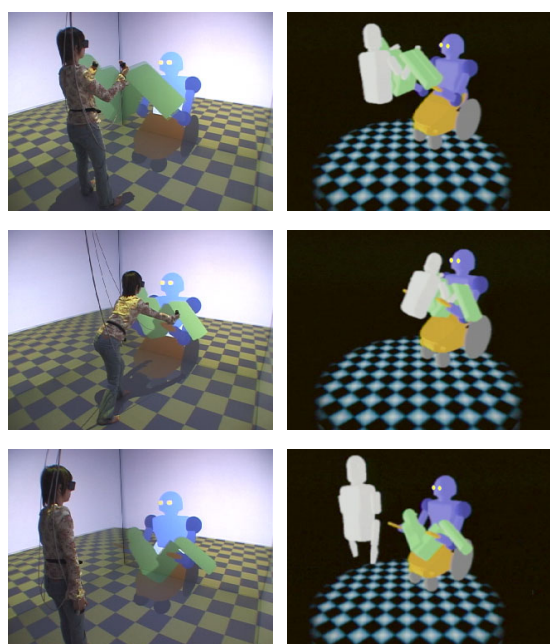


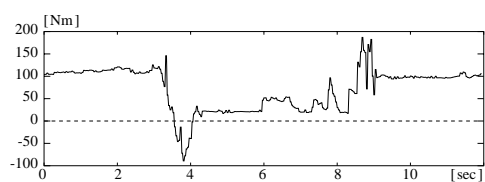
図 5 フルボディマニピュレーションの例
Fig. 5 Example of whole body manipulation.

置して撮影することで、整合のとれた図になるように配慮した。

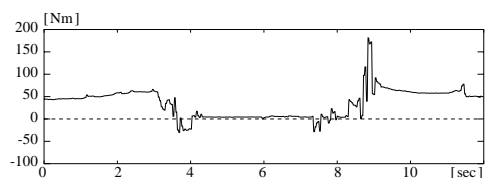
図 4 (d) の被験者は原寸大のロボットを目の前に体感することができ、仮想被験者を介してロボットの各部位に外力を与えることができる。図 4 において、被験者は仮想ロボットの右手の動きを両手を使って止めようとしており、被験者の動作により (b) のモーションキャプチャ結果と比べて、ロボットの右手の姿勢が大きく異なっているのが確認できる。また、被験者の動作によってはロボットが転倒することもあり、転倒位置からロボットの転倒音が発生するようにしてある。

6.2 人間を抱きかかえるロボットの開発支援

現在、我々の研究チームでは介護福祉の現場で活躍するロボットの実現を視野にいたった研究を行っており、具体的なタスクとしてロボットの全身を用いて人間を抱きかかえるフルボディマニピュレーションの実現を目指した研究 [13] を行っている。提案したシミュレーション環境は、フルボディマニピュレーションに関する研究のためのシミュレータとしても利用可能である。図 5 は被験者が抱えた 3 リンクのダミー人形をロボットに手渡すところであり、本シミュレーション環境を用いてロボットにタスクを行わせ、各関節に必要なトルクなどを調べることで、実際にロボットを製作する



(a) Torque of the shoulder joint



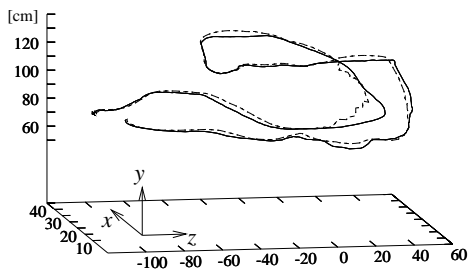
(b) Torque of the elbow joint

図 6 各関節のトルク値
Fig. 6 Torque of the each joint.

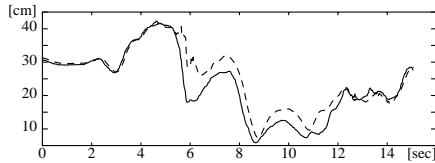
際に必要となるアクチュエータの性能などを見積もることができる。

図 6 は、47.5 [kg] のダミー人形を抱えたロボットから被験者がダミー人形をもらい受け、その後にロボットへと返す動作（以下、抱き上げタスクと呼ぶ）を行う際のトルクの時間変化をグラフ化したものである。ロボットは図 3 のように抱きかかえの姿勢を維持するように制御している。図 6 (a) が肩関節のトルクを表し、(b) が肘関節のトルクを表す。ロボットがダミー人形をもらう瞬間に特に大きなトルクを発生していることが分かる。また、得られた値から、現在市販されているアクチュエータの性能では、想定している仮想ロボットのサイズで実用的な運動速度を維持するのは難しいことが分かる。ただし、今回採用した腕の姿勢は必ずしも最適なものではないため、最適な軌道が得られた場合にはこの限りではない。抱え上げタスクに最適な軌道を得るには、前述のフルボディマニピュレーションによる理論的なアプローチや、Motion capture 部によって取得した人間の動作を詳細に検証する解析的な手法等が考えられるが、それらから得られた運動生成法の有効性は、本シミュレーション環境によって検証することが可能である。

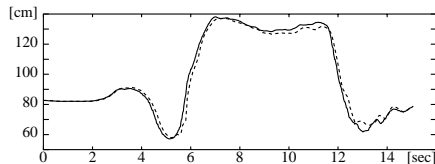
本実験で用いた磁気センサの位置精度に関する二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 2.5 [mm]、角度精度に関する RMSE は 0.5 [deg] である。しかし、被験者の上半身を 5 リンクでモデル化していることや、各リンクの長さや太さに誤差があること、更には目標位置に近づけるための速度制御に遅れが生じることなどが



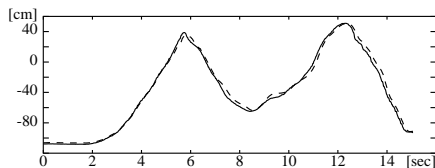
(a) Trajectory in the PC-CAVE structure



(b) Trajectory about x-axis



(c) Trajectory about y-axis



(d) Trajectory about z-axis

図7 被験者の手の軌跡

Fig. 7 Trajectory of subject's hand position.

ら被験者の動きと仮想被験者の動きにはそれ以上の誤差が生じる。この誤差の評価を行うために、抱き上げタスクを行う被験者の手先の位置と仮想被験者の手先の位置の誤差を測定した。図7に測定結果を示す。実線が被験者の左手に設置した磁気センサの位置を表し、点線が仮想被験者における同じ位置を表す。(a)はPC-CAVE内での三次元的な軌跡を表しており、このとき、ロボットの胴体の重心位置は(0, 84, 60)にあり、(0, 0, -1)の法線ベクトルの方向を向いている。また、(b),(c),(d)は横軸を時間として縦軸がそれぞれ、 x 軸、 y 軸、 z 軸に対する位置を表す。6秒付近にダミー人形をもらい受け、12秒付近にダミー人形を返している。

仮想被験者がロボットやダミー人形と衝突したと

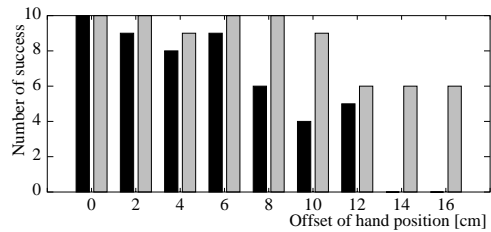


図8 オフセットとタスク成功率の関係

Fig. 8 Relationship between offset and success.

きに、位置に関する誤差が大きくなり、ロボットやダミー人形に接触しない場合における被験者と仮想被験者の手先位置のRMSEは1.55 [cm]であったが、抱き上げタスク実行時のRMSEは6.05 [cm]であった。 x 軸に対する誤差が大きいのはダミー人形を抱えた際にダミー人形の形状及び幾何学的拘束によって、仮想被験者の手先位置にも拘束が生じたためである。

次に、被験者と仮想被験者のずれが抱き上げタスクの実現にどのような影響を及ぼすかを調べる実験を行った。実験では、意図的に磁気センサの出力結果にオフセットを加えることで、被験者と仮想被験者にずれを生じさせ、その環境下で抱き上げタスクの成功率がどのように変化するかを調べた。オフセットは2 [cm]の刻み幅で最大16 [cm]まで変化させ、加える方向は試行ごとにランダムに決めた。各オフセットについて10回ずつ抱き上げタスクを行い、ダミー人形を床に落としたときを失敗とした。図8の濃色の棒グラフが、タスクの成功数を表す。オフセットが0 [cm]のときには試行した10回すべてにおいて成功した。また、オフセットが2~6 [cm]のときには8割以上の割合で成功しているが、8~12 [cm]のときには、5割程度しか成功しておらず、12 [cm]を越えた場合には一度も成功しなかった。

一方、仮想被験者の映像をPC-CAVEに投影すると、被験者は自分自身と重なるように仮想被験者を知覚するため、被験者の没入感が損なわれるという問題が生じるが、被験者は映像のフィードバックにより自分の動きを修正できるため、タスクの成功にとって有効である。そこで、仮想被験者の映像をPC-CAVEに投影した場合におけるタスク成功数を調べた。図8の淡色の棒グラフが映像フィードバックを行った際のタスクの成功数を表す。いずれのオフセットにおいても、映像フィードバックがない場合に比べてタスク成功率が上昇することを確認した。



(a) Image from left eye (b) Image from right eye

図 9 仮想視覚センサからの入力画像
Fig. 9 Input image by visual sensor.

6.3 センサシミュレータ

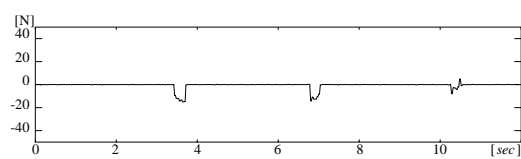
提案するシミュレーション環境では、仮想的なセンサの追加を容易に行うことができる。人間と接するロボットに必要なセンサはいくつか考えられるが、本論文では視覚センサと力覚センサのシミュレーションを実現した。視覚センサに関しては、ロボットの目の位置に仮想カメラを設置し、そこから得られる画像を OpenGL によってレンダリングすることで、カメラから得られる入力画像を擬似的につくり出すことができる。また、力覚センサに関しては、6 軸の力センサをリンクに想定することでそのリンクにかかる並進力とトルクを測定することができる。

仮想的に設置した視覚センサと力覚センサを用いたデータ入力を行った。図 5 上段時における視覚センサによる入力画像を図 9 に示す。(a) がロボットの左目、(b) がロボットの右目の位置に設置したカメラから得られた画像である。ロボット自身の腕や仮想被験者に抱かれているダミー人形が確認できる。これらの入力画像は、エッジ処理を施すなどの画像処理を行うことによって、画像情報を反映させたビジュアルフィードバックなどの制御に用いることも可能である。

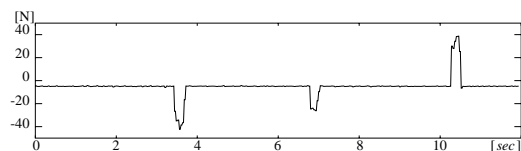
図 10 には力センサから得られた力の値を示す。これは、肘関節角度を 90 [deg] に維持するように制御したロボットの手を被験者が上から 2 回、下から 1 回たたいた際にロボットの手首に想定した力センサが出力した値である。図は、上から x 軸、 y 軸、 z 軸の力の大きさを表す。 y 軸は鉛直上向きの力を正とする座標系であり、(b) のグラフから被験者が叩いた方向を確認できる。この力センサは、仮想被験者上にも設定できるため、そこで得られた値は、将来開発する被験者用力覚提示装置の提示力の目標値に用いることができる。

7. 考 察

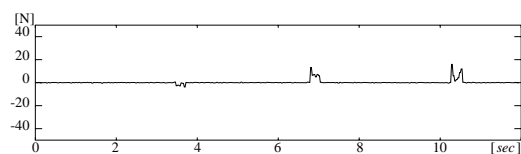
本論文で提案した没入型三次元動力学シミュレー



(a) Force of x -axis



(b) Force of y -axis



(c) Force of z -axis

図 10 力センサからの入力データ
Fig. 10 Input data by force sensor.

ション環境について考察する。

- 人間と接するロボットのためのシミュレータ

本論文では、人間と接するロボットを開発するための没入型三次元動力学シミュレーション環境を提案した。本シミュレーション環境は被験者に仮想現実感の技術を用いて視聴覚情報を与えることで、高い没入感でロボットを体感させることができるため、ロボットの色や形状が人間の主観にどのような影響を与えるかを調べることができる [8]。また、被験者の体につけた磁気センサを用いて手の動きなどを測定しており、ロボットを押したりロボットと共同で物体をもつなど人間の動作をロボットの動作に反映させることができる。想定した仮想ロボットは人間と接することを目的としたものであるため、対人親和性向上の観点から人間に近い形状・動作を実現していることが望ましいと考えた。その場合ロボットは必然的に冗長自由度系となるが、その運動計画は一般的に困難なものになる。そこで、モーションキャプチャにより人間の運動を取得し、そのデータをもとにロボットの目標運動を生成した。目標関節角度を実現する制御入力と仮想被験者によって与えられる外力によって最終的なロボットの動作がリアルタイムで計算される。計算機上の仮想空間でロボットを作成しているため、仮想センサなどの取付けが容易である。その代表的なものとして視覚センサと力センサを取り上げ、その出力を確認した。これらの

仮想センサ情報は、視覚フィードバックや力覚フィードバックを行う際に利用可能である。

- 被験者と仮想被験者の間に生じる誤差

被験者と仮想被験者の位置の間には実験で述べたような誤差が生じるため、本シミュレーション環境は [cm] 単位の高い精度が要求されるタスクのシミュレーションには向いていない。しかし、今回想定した [m] 単位の人間を抱き上げるというタスクに関しては、被験者が一度もタスクに失敗することはなかったことから、タスクによってはシミュレーション可能であると考えられる。また、高い精度が要求されるタスクを行う場合には、仮想被験者の映像を PC-CAVE に提示することで、タスクの成功率を上げることができる。誤差を小さくする方法としては、精密な被験者モデルを作成することや、センサ位置などのキャリブレーションを行うことなどが考えられる。

- バイオ・ミメティック研究のプラットフォーム

今回の実験ではモーションキャプチャによって得られた関節角度のみを使用した。将来的には筋音計 (MMG) や加速度センサ更には床反力計などを用いて身体運動全体を多面的に計測することが可能なシステム構成になっており、解析された運動から推定できるトルクに基づいた制御を実現することが期待できる。今後、これらのシステムを用いることで、ロボットに人間のような高度な運動技術を模倣させると同時に、人間の高度な運動制御メカニズムを探求することができると考えている。また、仮想ロボットだけではなく、被験者の動きによって制御される仮想被験者をロボットとみなすこともできる。その場合には、被験者はロボット自身に没入する形でロボットに教示動作を与えることができ、タスク成功時に得られたデータを解析することによってロボットに人間の運動技術を模倣させること [14] が可能になると考えられる。

- 今後の課題

本シミュレーション環境は、被験者に対して視覚と聴覚の情報を提供し、仮想被験者を介してロボットに力を与えることができるが、被験者は触れたという力覚情報を感じることはできないという問題が残されている。そのため、被験者はロボットに対して力を与えることで視覚的に変位を観測することができるものの、ロボットから力を受けることができないという、感覚的な矛盾を感じる結果となった。シミュレータ内の物体の存在感を高めるためには、被験者に力覚を感じさせることが重要な課題である。また、被験者に力覚を

提示することで厳密な意味での力覚的な相互作用が可能になる。力覚の提示を目的とした研究はこれまでも数多く提案されているが、PC-CAVE の内部では磁気センサによって被験者の位置・姿勢を検出しているため、磁気に影響を及ぼさない素材で力覚提示装置を構築する必要がある。大きな提示装置は PC-CAVE 内の視覚情報を遮るため、小型でかつ十分な力を発生できる装置でなくてはならないという問題もある。今のところ、人間と同程度の自由度をもつ骨格を背負うことで力覚提示を行う装置の開発を検討中である。また、本実験では Motion capture 部で動きを計測している人間に対して視覚や力覚の提示を行っていないが、前述の力覚提示装置が完成すれば、ヘッドマウントディスプレイ等の視覚提示装置と力覚提示装置を用いて Motion capture 部の人間に対して視覚・力覚情報を提示することで、Immersion type display 部の被験者が与えた外力に対して、Motion capture 部の人間がどのように反応するかを調べることも可能になる。

8. む す び

本論文では、人間と接することを目的としたロボットの設計や評価を安全かつ容易に行うための没入型三次元動力学ロボットシミュレーション環境を提案した。本シミュレーション環境は Immersion type display 部、3D dynamic simulator 部と Motion capture 部の三つの部分で構成され、被験者は人間の動きに追従して動作する仮想ロボットを没入感の高い装置で体感することができる。実験としては、人間の動作をもとに運動する仮想ロボットが、被験者に追従する仮想被験者から作用力を受ける場合の動力学シミュレーションを行った。また、シミュレータ内に視覚と力覚に関する仮想センサを実現することで、仮想空間内の情報を取得し、ロボットの設計支援や動作検証などへの応用の可能性を示した。

現段階では、被験者と仮想ロボットの間の力覚提示装置が完成しておらず、その開発は今後の最優先課題である。また、モーションキャプチャだけではなく、筋電計や床反力計などを用いて人間が動作しているときに発生する関節トルクを求め、そのトルクをもとに生成した目標トルクを仮想ロボットに発生させることで、ロボットの運動に人間のような高度な動作を取り入れることも今後の課題である。

文 献

- [1] T. Shibata and K. Tanie, "Emergence of affective

- behaviors through physical interaction between human and mental commit robot," J. of Robotics and Mechatronics, vol.13, no.5, pp.505-516, 2001.
- [2] H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, T. Maeda, T. Kanda, and R. Nakatsu, "Robovie: An interactive humanoid robot," Int. Journal Industrial Robotics, vol.28, no.6, pp.498-503, 2001.
- [3] S. Waldherr, R. Romero, and S. Thrun, "A gesture-based interface for human-robot interaction," Autonomous Robots, vol.9, no.2, pp.151-173, Sept. 2000.
- [4] 中村仁彦, 比留川博久, 山根 克, 梶田秀司, 横井一仁, 藤江正克, 高西淳夫, 藤原清司, 永嶋史朗, 村瀬有一, 稲葉雅幸, 井上博允, "仮想ロボットプラットフォーム," 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.28-36, Jan. 2001.
- [5] O. Khatib, O. Brock, K.S.Chang, F. Conti, D. Ruspin, and L.Sentis, "Robotics and interactive simulation," Commun. of the ACM, vol.45, no.3, pp.46-51, March 2002.
- [6] F. Gravez, B. Mohamed, and F. B. Ouezdou, "Dynamic simulation of a humanoid robot with four DOFs torso," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.511-516, May 2002.
- [7] T. M. Sobh, A. A. Abuzneid, and R. Mihali, "A PC-based simulator/controller/monitor software for a generic 6-DOF manipulator," J. Intelligent and Robotic Systems, vol.31, no.4, pp.355-377, 2001.
- [8] 大西正輝, 小田島正, 羅 志偉, 細江繁幸, "人間と接するロボットを開発するための没入型三次元動力学シミュレーション環境," 信学技報, PRMU2003-187, Jan. 2004.
- [9] C. Cruz-Neira, D. Sandin, and T. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE," Proc. SIGGRAPH 93, pp.135-142, 1993.
- [10] M. Hirose, "CABIN - A multiscreen display for computer experiments," Proc. of IEEE International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.78-83, Sept. 1997.
- [11] N. S. Pollard, J. K. Hodgins, M. J. Riley, and C. G. Atkeson, "Adapting human motion for the control of a humanoid robot," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1390-1396, May 2002.
- [12] K. Kurihara, S. Hoshino, K. Yamane, and Y. Nakamura, "Optical motion capture system with pan-tilt camera tracking and realtime data processing," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1241-1248, May 2002.
- [13] F. Asano, Z. W. Luo, M. Yamakita, and S. Hosoe, "Dynamic modeling and control for whole body manipulation," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3162-3167, Oct. 2003.
- [14] 大西正輝, 小田島正, 羅 志偉, "認識情報を考慮した模

倣動作生成によるロボット制御," 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004) 論文集 I, pp.422-427, July 2004.

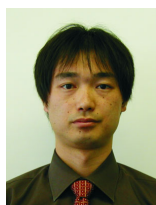
(平成 16 年 3 月 29 日受付, 8 月 2 日再受付)



大西 正輝 (正員)

1997 阪府大・工・情報卒。2002 同大学院博士後期課程了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム・研究員, 現在に至る。ロボットの認知・知識処理に関する研究に従事。電気学会, 映像情報メディア学会各会員。工博。

日本ロボット学会, 映像情報メディア学会各会員。工博。



小田島 正

1995 名大・工・電子機械卒。2000 同大学院博士後期課程了。同年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム・研究員, 現在に至る。自律分散制御を用いたロボットシステムの研究に従事。日本ロボット学会, 日本機械学会各会員。工博。

日本ロボット学会, 日本機械学会各会員。工博。



羅 志偉

1984 中国華中工学院自動制御と計算機学部卒業。同年中国蘇州大学教師, 1986 愛工大客員研究員。1991 名大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程了。1992 同大学院博士後期課程了。同年豊橋技科大助手。理化学研究所フロンティア研究員,

山形大学工学部助教授を経て, 現在, 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・環境適応ロボットシステム研究チーム・チームリーダー。ロボティクス, 制御工学の研究に従事。計測自動制御学会, 日本神経回路学会, IEEE 等各会員。工博。



細江 繁幸

1965 名大・工・金属卒。1967 同大学院博士前期課程了。同年名大・工・助手。同大講師, 助教授を経て 1988 名大・工・情報工学科教授。1993 同大学院工学研究科電子機械工学専攻教授。1999 理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター・制御系理論研究チーム・チームリーダーを併任, 2001 同研究所センター長, 同運動系システム制御理論研究チームリーダーを併任, 現在に至る。その間, 制御理論, システム理論などに関する研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, 機械学会, システム制御情報学会, IEEE 各会員。工博。