

# 福祉機器設計のための VRシミュレーション提示技術に関する研究(第1報)

藤井 勝敏

## Study on VR & Simulation Visualization for Design Support of Welfare Robots (I)

Katsutoshi FUJII

あらまし 身体的な力作用を伴う福祉機器の設計を支援するために、身体特性に基づいた運動学的な設計評価を仮想空間内で実現することを目的に、仮想的なシミュレーション環境に実装可能な仮想人体モデルの構築を行う。構築する仮想人体モデルは、順運動学、逆運動学による制御が可能で、設計評価用のシミュレーション環境に組み込んで自由にポーズを取らせることができる。仮想空間を使ったシミュレーション提示技術を利用して、介護サービスに伴うユーザの動作・痛み・負担などの検証に利用することができる。

キーワード 介護サービス、仮想人体モデル、順・逆運動学、シミュレーション

### 1. はじめに

急速に進む少子高齢化社会において、高齢者福祉・介護問題への関心や社会的ニーズの高まりを感じられる近年、福祉機器の分野において情報技術(IT)を応用した自動装置が開発され、製品化されている<sup>[1]</sup>。例えば、身体の不自由な高齢者でも容易に電気機器の操作やコミュニケーションを可能にするものや、患者の状態を常時監視することによって、緊急事態が発生した際、本人に代わって異常等を通報する装置などがある。このような装置は、高齢者にとって現代的で便利な生活水準を維持し、同時に家族の負担を軽減する目的で開発され、実際にその目的において有効であると言える。しかし一方で、衣食住に関わるような人間が生きていく上で基本的に必要な、家事等の支援を行う自動装置(ロボット)の製品化は遅れているのが現状である<sup>[2]</sup>。

これは、これまでに開発されてきた福祉目的の自動装置は、高度なセンシング技術やユーザインタフェース技術を基本としており、安全性・安定性に配慮してできる限りユーザである介護対象者との直接的な接触を避けて設計されてきたからである。しかし、肉体的にも精神的にも衰える高齢者の生活を実質的に支援し、その生命や尊厳を守るためには、福祉機器自身が自律的に状況を判断し、能動的にユーザの身体に作用することで、介護サービスを提供することが必要である。

そこで本研究は、最終的には福祉介護の現場で日常的

なニーズのある介護サービスを、自動機械装置(自律判断するロボット)に任せられる未来を目指し、そのような福祉機器の設計を、情報技術により支援することを目的としている。そのための具体的な手段として、近年アミューズメント分野などで非常に発達している人体表現技術を導入し、日常的な介護の場面や緊急的な状況を仮想的に構築することによって、そこで人間に対して行うべき介護サービスを検討することや、設計したロボットの動作検証をすることを提案する。

これによって、被験者を使った実験が不安な場合やプロトタイプ製作の前に、3次元的に人体に作用する機械装置のイメージを具体化しやすくし、設計の段階で危険性を予見可能にし、解決すべき技術的課題を明らかにすることができることを期待している。

本報告では、まず高齢者介護において自動化すべきサービスについて考察し、福祉機器の設計支援において必要不可欠な要素技術である福祉機器ユーザのモデル化(仮想人体モデル)とその制御方法を中心に述べる。また、その仮想人体モデルを利用して試作した仮想介護シミュレーション環境とその利用可能性について考察し、今後の方針について述べる。

### 2. 高齢者介護サービス

厚生労働省の要介護認定の基準に係わる介護行為は、

- 入浴、排泄、食事等の介護

- 洗濯，掃除等の家事援助等
  - 徘徊に対する探索，不潔な行為に対する後始末等
  - 歩行訓練，日常生活訓練等の機能訓練
  - 輸液の管理，褥瘡の処置等の診療の補助等
- となっている<sup>[3]</sup>．これらの介護サービスを機械化，自動化することは，現時点の技術水準では困難な点が多々あるが，サービス品質の管理・改善やプライバシー保護の観点からは，これらのサービスをロボットに任せることには大きな意義があると考えている．本研究では特に一番目の入浴，排泄，食事等の介護について注目する．

心身の健康状態を維持し，清潔で快適な生活を送るためには例え寝たきり状態が中心の生活となっても適度に体を動かすことが重要である．しかし筋力が不足している場合，器具や電動装置の補助を得たとしても，独力で行動すると，転落・転倒の危険を自力で回避できないため事故につながる危険性がある．そのために介護が必要なのであり，介護・看護の専門教育では，人間工学の研究成果に基づき，安全で効率の良い介護技能の普及が図られている<sup>[4]</sup>．

同等なサービスをロボットにさせられれば，介護技能の熟練度に影響しないサービス品質が実現でき，ヒューマノイド型である必然性はないため，設計次第で人間よりも効率の良いメカニズムの導入が期待できる．しかしこの場合，ロボットと人間がうまく組み合わせなければ危険であるから，設計者は人間の身体特性について十分理解しあらゆる条件を想定する必要がある．

### 3．仮想人体モデル

自動車や家具など，人間を搭載することや人間が使用することを目的とする工業製品では，設計時に人体の物理的特性を考慮したモデルが利用されてきた．簡単な例は，体重相当の砂袋やブロックである<sup>[5]</sup>．しかし身体特性を考慮する必要がある場合は，体重に加えて身長，五体の配置，可動範囲の設定されたマネキンが利用されている<sup>[6]</sup>．

前章で述べた介護行為を目的とする福祉機器の設計においても，同様な人体モデルが有効であると考えられる．人体モデルを手軽に製作・運用・調整するには，マネキンよりも仮想人体を使うと便利であるため，本章では，近年のゲーム開発で利用されている手法を参考に，仮想人体を計算機内にモデル化する方法について述べる．

#### 3．1 骨格モデル

一般的に知られているように，人体は多数の骨が軟骨のある関節で接合され，筋肉の作用により活動することができる．スポーツ医学などではこのメカニズムの詳細なモデル化が要求されるが，通常的设计段階にはデッサン人形(図1)のように，固定長のリンクと可動ジョイントで構成された人体モデルが利用される．これを骨格モデル(Skeleton Model)と呼ぶ．

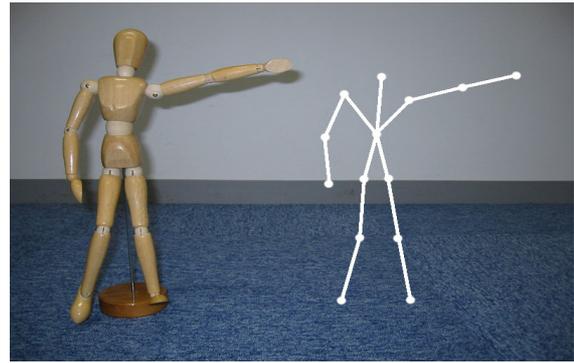


図1 デッサン人形と骨格モデル

骨格モデルのデータ構造による表現は唯一のルート関節を基準とする木構造で示せるため，単一の関節情報は例えば下記のように記憶する．

```
class Joint {
    double x,y,z;
    Quaternion q;
    Joint *p;
};
```

$x,y,z$ は，親関節が存在する場合は親座標系による関節の中心位置移動量で，親関節がない場合はルート関節のワールド座標を表す  $q$ はこの中心位置での座標系の回転を表す四元数(Quaternion)<sup>[7]</sup>である．四元数の使用方法については次節で述べる  $p$ は木構造における直接の親関節を指す．これらにより，任意に枝分かれする多関節構造が定義できる．

またこの表現において，移動量および回転の逆変換が

$$\begin{aligned} Trans(x, y, z)^{-1} &= Trans(-x, -y, -z) \\ Rot(q)^{-1} &= Rot(q^{-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

として容易かつ確実に計算できるため，親子関係の逆転が可能である．これにより，任意の関節をルートにすることができる．但し，初期設定の木構造における，同一の親を持つ兄弟関節同士の位置関係は保存されるべきであるため，ルート関節の変更の際は，図2に示すような親子関係の操作も同時に行う必要がある．

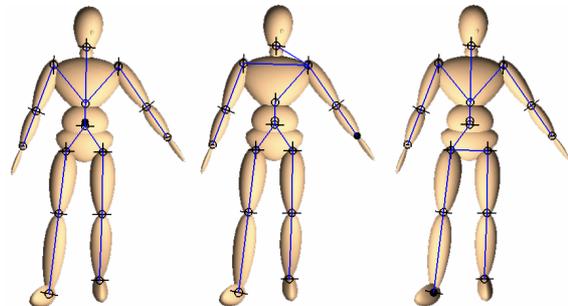


図2 ルート関節の変更  
(左から腰、左手、右足)

### 3.2 関節の位置

産業技術総合研究所より公開されている人体寸法データベース<sup>[8]</sup>や人体計測手法<sup>[9]</sup>により、人体の外形寸法が得られる。骨格モデルでは親関節中心からの相対的な位置により定義しているため、正確な人体モデルを作るには身体各部位の回転中心位置が必要である。この位置については、外形寸法から股関節の中心を推定する手法<sup>[10]</sup>が提案されている。

全身の関節位置を決めるための簡便な方法として、表示用のスキン(人体形状)と標準的な骨格モデル結合し回転させ、最も自然な動作に見える回転中心位置を探す方法もある。スキンを重要視するCGキャラクター制作ではこの方法が用いられることがある<sup>[11]</sup>。

### 3.3 四元数と関節の回転

前述のように、関節ごとの回転は四元数 $q$ により記憶させている。四元数とは、4つの独立した実数 $(w, i, j, k)$ の組み合わせによって表現された複素数の拡張である。ある右手系3次元座標系において、単位ベクトル $V(x, y, z)$ の回りに右回りに回転する操作 $rot(\theta, V)$ を次の四元数で表現することにする。

$$\begin{pmatrix} w \\ i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2)x \\ \sin(\theta/2)y \\ \sin(\theta/2)z \end{pmatrix} \quad (2)$$

この表現と、四元数の演算規則により、逆回転(逆元)の計算や、蓄積的な回転(積算)が容易に実装できる。後者の性質は特にCADなどの対話的アプリケーションにおける回転インタフェースとして有効である。また上の式における三角関数は、半角の公式により $\cos$ を含む式に変換できるが、

$$\cos \theta = a \cdot b / (|a| \times |b|) \quad (3)$$

であるため、ベクトル演算との親和性が高い性質があり、後述する逆運動学計算に利用している。

四元数による回転の表現は完全に自由回転であるが、人体モデルでの実装においては、肘・膝のように単一の軸まわりの回転に限定させる場合や、回転範囲を制限したい場合がある。このような場合、

$$\Theta = q \times (V \cdot H) \quad (4)$$

により、 $rot(\theta, V)$ で与えた任意の回転角度 $\theta$ と回転軸ベクトル $V$ から、規定の回転軸 $H$ 周りの角度成分 $\Theta$ を抽出し、関節の回転を保持する四元数に $rot(\theta, H)$ を積算することで回転軸を拘束することができる。また回転軸 $H$ と直行するベクトルについて、回転変換前後になす角を求めれば、現在の絶対的な回転角度を求めることができ、それにより関節の回転範囲を制限することができる。

### 3.4 制御手法

骨格モデルは、関節間の距離を一定にして、回転量のみを変化させてさまざまなポーズを制御する。最も基本的な方法は関節ごとに回転量を設定する方法で、ルート

関節から末端関節に向かって順々に回転が影響することから、順運動学(FK: Forward Kinematics)と呼ばれる。FKをCADのインタフェースとして実装する場合、ユーザの操作によって得られたワールド回転軸を、制御対象関節の親関節の座標系に変換してから、制御対象関節の回転四元数に乗ると良い。

FKインタフェースの使用感は、マネキン人形の関節を折り曲げる手順に似ているが、人間にポーズを指示する場合には、手取り足取りと言うように末端部分の位置を与える方が、扱いやすいことがある。この場合、末端部分が指定の位置に合うように、ルート関節までの各関節角度を自動的に計算させる。このような制御方法は逆運動学(IK: Inverse Kinematics)と呼ばれる。IKの実装方法はいくつかあるが、今回は実装が容易で計算量が少なく、拘束条件が設定でき、比較的収束が早いと言われるCCD法(Cyclic Coordinate Descent Method)<sup>[12]</sup>を導入した。

この方法は図3に示すように、末端の関節からルート関節の順に、作用点が目的の座標の方向を向くよう回転させる計算で実現される。関節ごとの演算は、2つのベクトルを一致させる回転の生成と、関節の拘束条件内での回転だけで構成されており、誤差を直接評価していないが、反復することによって収束する性質がある。

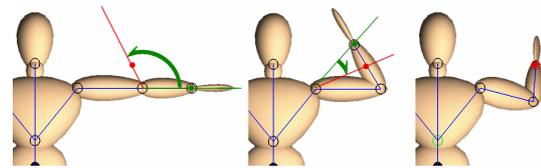


図3 CCD法

より高度な制御方法には、重力、慣性モーメント、摩擦などを反映した物理運動シミュレーションがある。この実装のためには、これまでに定義した骨格モデルだけでなく、身体部位の質量や重心などが必要である。この手法については来年度以降検討する予定である。

## 4. 仮想介護シミュレータ

前章では仮想人体モデルの実装方法について述べたが、仮想環境の体験およびシミュレーションを目的とした独自アプリケーションに、この仮想人体モデルを組み込むことによって、CGソフト等による既定動作のアニメーション生成よりも興味深い応用が考えられる。

図4は没入型6面ディスプレイCOSMOS用アプリケーションに仮想人体モデルを組み込んだ事例である。このアプリケーションは、ベッドに横たわる人体の各部を持って動作させたときの、姿勢の変化を観察するためのシミュレータである。現在のところ、等身大デッサン人形としての機能を実現したに過ぎないが、今後物理運動シミュレーションや接触判定などを盛り込み高度化し、実

用的な仮想介護シミュレータに発展させる予定である。それと同時に、別途設計し、作業手順をプログラムされた仮想介護ロボットに介護をさせるシミュレーションができるようにする予定である。



図4 開発中の仮想介護シミュレータ

このような仮想介護環境のシミュレーションを行う目的および利点は、

- 設計者が身体の動作を理解できる
- 仮想の介護ロボットの設計検証ができる
- 安全である
- 実験環境・条件の設定が容易に可能である
- 反復して実験が可能である
- 見えない力や痛みなどを可視化できる

などであると考えている。図5では、関節の角度が既定の動作範囲の限界に近づいたことを表示することで、痛みや負担の可視化を試みた。このような表現はVRならではの機能であるため、実世界での現象との対応づけを含め、今後充実していきたいと考えている。

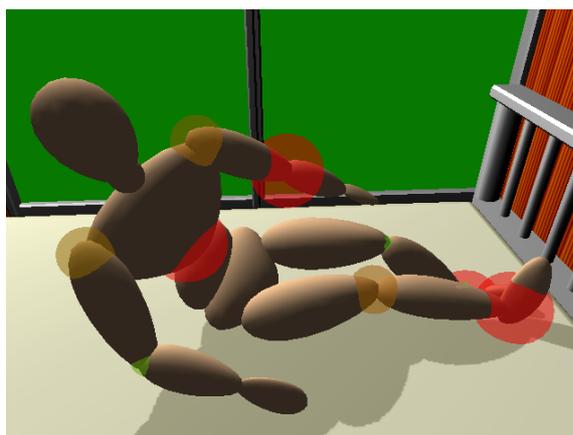


図5 関節動作限界の提示

## 5. まとめ

福祉・介護サービスの中でも移動介護のように、対象者と接触して行う行為に注目し、その安全実施に必要な運動学的な身体特性の理解をしやすいするため、仮想的な人体モデルを導入した。また仮想人体モデルを利用して、仮想空間内で身体の動作シミュレーションができる仮想環境を構築した。

今後は、物理的作用の計算モデルを組み合わせることにより、現実に近い仮想介護シミュレーション環境へと発展させ、福祉機器を使用した介護サービスの最中に発生しうる事故の予見ができるように開発を継続する予定である。

## 文 献

- [1] “福祉用具総覧2001”, テクノエイド協会, 2001.
- [2] 臼井良明, 浅田稔, “身近になるロボット”, 大阪大学出版会, pp.10, 2001.
- [3] “厚生省令第五十八号”, 1999.
- [4] 大河原千鶴子, 酒井一博, “看護の人間工学”, 医歯薬出版, pp.113-120, 2002.
- [5] 日本規格協会, “手動車いす”, JIS T9201, 1998.
- [6] 日本規格協会, “自動車室内寸法測定用三次元座位人体模型”, JIS D4607, 1994.
- [7] Mark Deloura, “Game Programming Gems”, ボーンデジタル, pp.188-192, 2002.
- [8] 河内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二, “日本人人体寸法データベース1997-98”, 通商産業省工業技術院くらしとJISセンター, 2000.
- [9] “設計のための人体計測マニュアル”, 生命工学研究所, 1994.
- [10] 倉林 準, 持丸正明, 河内まき子, “日本人男性の股関節中心推定方法の比較・検討”, デジタルヒューマン基盤技術平成14年度成果報告書, pp.70-77, 2003.
- [11] ジョージ・マエストリ, “デジタルキャラクターアニメーション”, プレンティスホール出版, pp.70-76, 1999.
- [12] 久保裕一郎, “Enter the 3D Programming 第10回”, C MAGAZINE 2001年7月号, pp.110-115, 2001.