

足踏式移動インタフェース WARP を用いた 多人数共有仮想空間歩行システムの試作

下地崇^{*1}, 藤田欣也^{*1}

Development of Shared-Space Walk-through System with Locomotion Interface WARP

Takashi SHIMOJI and Kinya FUJITA

Abstract: Realization of walk-through in shared-virtual environment over Internet is expected to be utilized in at-home rehabilitation or multi-user amusement system. This study proposes a system for multi-user walk-through system using client/server system and locomotion interface using walk-in-real-place "WARP". The position error, angle error and curvature of avatar trajectory were evaluated at various communication intervals. It was demonstrated that the smooth and accurate avatar animation of remote user in shared virtual space was attained by the developed system.

Key Words: shared virtual environment, walk through, locomotion interface, avatar animation, client/server

1. はじめに

計算能力と3次元グラフィクス描画速度の向上によって仮想環境の構築が容易になったこと、またネットワーク技術の進歩によって情報伝達が高速になったことなどを背景に、仮想空間を遠隔共有してコミュニケーションを行うシステムが盛んに研究されるようになってきている。多くの仮想空間内コミュニケーションシステム、例えば Cassell らによる仮想空間内チャットシステム BodyChat [1]では、ジェスチャ機能を持ったアバタを利用して遠隔ユーザの情報を提示し、コミュニケーションの円滑化を図っている。河野らは、没入型共有仮想空間において、モーションキャプチャデータをアバタ表示することでコミュニケーションを図っている [2]。小木らは、没入空間で実写画像によるビデオアバタを用いたコミュニケーションシステムを開発している [3]。

また、仮想空間での歩行に着目すると、遠隔共有仮想空間内においてロコモーションインタフェースを用いた歩行を実現したシステムには、野間らによる協調歩行感覚提示装置がある [4]。このシステムでは遠隔地に設置された二基の歩行感覚提示装置を ISDN 回線を用いて接続し、それぞれのユーザが双方の歩行動作を協調させることで歩行感覚の共有を行うものである。矢野らのシステム [5]も同様に、2点間での歩行感覚の共有を目的としている。

これらの研究が、二人三脚のように密な歩行感覚の共有を指向しているのに対し、単に空間を共有し、複数ユーザが同一空間に存在する他者を認知しながら歩行するシステムも考えられる。この場合、空間を共有してコミュニケーションをはかりながら、各ユーザが独自に歩行訓練を行う在宅リハビリテーションシステムへの応用などが考えられる。

このような用途では、複数の個人ユーザがインターネットを利用して仮想空間を共有することが想定されるため、アバタの位置や方向に通信遅延や遅延時間変動による誤差が発生して不自然な歩行アニメーションとなり、ユーザに違和感を与えるおそれがある。しかし、これまでに提案されている Dead Reckoning [6,7]等の予測手法は、単に通信データ量と予測誤差の軽減を目的としたもので、アバタの歩行アニメーションからユーザが受ける違和感に関しては、考慮されていなかった。

そこで本研究では前記のような複数ユーザによる在宅利用を想定し、特に低速データ通信環境における低頻度通信条件においても、円滑で違和感が少ないアバタアニメーションの実現を重視し、個人宅でも使用が可能な小型の仮想空間移動インタフェースを利用した、多数ユーザによる共有仮想空間歩行システムを試作したので報告する。

2. システム設計

2.1 通信モデル

ネットワーク接続された複数のユーザが仮想空間を共有するためには、相互に情報を交換する必要がある。

*1: 東京農工大学 工学部

*1: Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

多数ユーザで空間を共有する場合、ピア・ツー・ピア方式では通信負荷が増大することや、情報の整合性に問題が生じる可能性もあることから、本研究では、全ユーザの状態を一元管理するサーバを介して、各クライアントが情報を交換する、クライアント/サーバ方式を用いた。また、サーバの通信負荷を軽減するとともに、低速通信環境にあるユーザも利用可能とするために、仮想環境の情報は各ユーザに予め配布しておき、位置や速度等のユーザ情報のみをネットワークを介して通信する方式を採用した。試作システムの通信モデルを図1に示す。

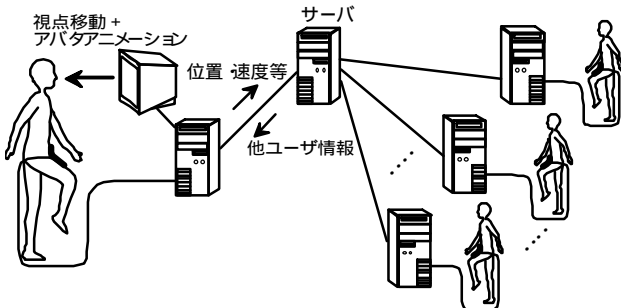


図1 クライアント/サーバ仮想空間共有通信モデル

2.2 ユーザ情報管理サーバ

ネットワークサーバの種類には繰返し型と並行型の2種類がある。繰返し型では、参加ユーザ数が増加したときに応答遅延が増大するため、本研究では応答性に優れた並行型サーバを用いた。サーバでは、各クライアントの接続要求を受けると、それぞれのクライアントごとにスレッドを生成し、各スレッドでは、定期的に送信されてくるユーザの情報を格納し、仮想空間に参加している全ユーザの情報を送信する。ユーザ1人当たりのデータ量は、位置、速度と方向に加え、後述の予測に使用するために曲率を加えた4データで、データ長は30バイトである。

2.3 クライアント

クライアントでの処理は、大きく分けて、1)歩行インタフェースを使用した仮想空間内の移動処理、2)一定時間間隔でのサーバへの自己情報送信と遠隔ユーザ情報の取得、3)取得した情報からの遠隔ユーザの状態予測と補間、4)遠隔ユーザの歩行アニメーションの描画、の4つに大別される。クライアントプログラムを実行する計算機能力のばらつきを考慮し、試作したシステムでは、上記のうち2)の通信のみを別スレッドとして一定時間間隔で実行し、その他の処理は通信と非同期に実行するように実装した。

仮想空間移動のためのインタフェースは、改良型足踏式空間移動インタフェース“WARP”[8]（以下、単にWARPと表記）を利用した。WARPはベルト装着式のハードウェアを有し、実時間での速度制御と、画面と身体と成す角による方向転換が可能である[9]。歩行アニメーションおよび、遠隔ユーザの予測と補間の方法は、次章以降に詳述する。

3. 遠隔ユーザの状態予測と補間

高速広帯域のネットワーク環境においては、頻りにアバタの位置情報を送受信することによって円滑な歩行アニメーションを期待できる。しかし、インターネットのように通信速度が保証されず遅延時間変動が大きい環境においては、高頻度のデータ通信は必ずしもアニメーションの円滑さに直結せず、ユーザに違和感を与えるおそれがある。これを避けるためには、各クライアントは低頻度で通信をおこない、遠隔ユーザに関する情報が通信によって得られるまで、予測して表示する必要がある。さらに、予測した状態と、通信によって取得した情報には誤差が生じるため、逐次この誤差を修正しつつ、次の通信時刻まで状態を補間しながらアバタを描画する必要がある。本研究でもNPSNET等の先行研究と同様に、以下のような方法で遠隔ユーザの状態予測と補間をおこない、比較検討をおこなった。

3.1 遠隔ユーザの状態予測法

(1) 線形予測法

図2のように、遠隔ユーザは、時刻 t_0 にサーバから受信した速度と方向のまま次の通信時刻 t_1 まで直進すると仮定し、 t_1 における遠隔ユーザの位置 \hat{P}_{1L} を予測する方法である。

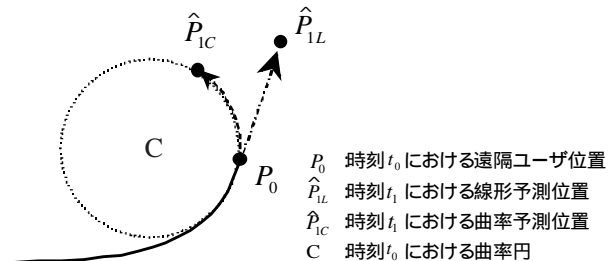


図2 線形予測法と曲率予測法

(2) 曲率予測法

線形予測法の場合、予測対象である遠隔ユーザが曲がりながら歩行すると、位置や方向の予測誤差が増加する。そこで、Dead Reckoning[7]やWray[10]らの方法と同様に、曲率を用いてアバタの移動経路を円弧で近似し、次のデータ受信時刻 t_1 における遠隔ユーザの位置 \hat{P}_{1C} を予測する方法である。ユーザが円滑に曲がる場合には予測誤差が減少することが期待される。しかし、仮想空間移動インタフェースでは、画像処理や地磁気センサなどを用いて身体方向を検出し、これをもとに進行方向を決定するが、歩行や足踏みは全身運動であるため、身体方向の計測誤差は避けられない。このため、算出される曲率の経時波形は常に変動を伴い、逆に予測誤差が増大したり、ユーザに違和感を与えたり

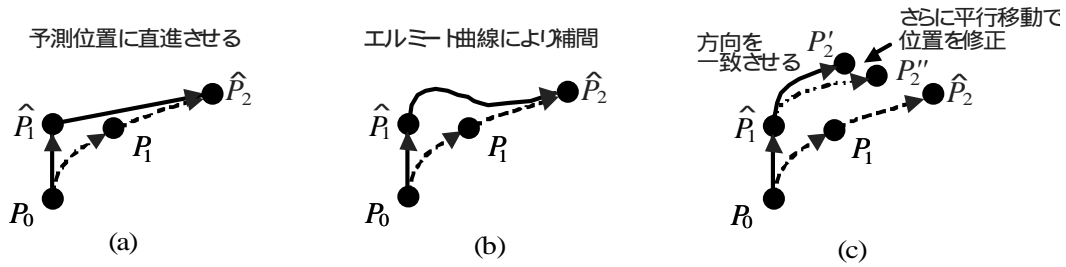


図3 遠隔ユーザ状態予測値の補間法。(a)線形補間,(b)エルミート補間,(c)方向一致法.時刻 t_0 の状態 p_0 から予測された時刻 t_1 の状態が \hat{p}_1 ,実際の状態が p_1 であるとき, \hat{p}_1 から p_1 から予測された状態 \hat{p}_2 にむけて補間をおこなうことでアバタの位置,速度および方向を決定する.

する可能性もある.

3.2 遠隔ユーザ状態予測値の補間法

予測誤差を修正しつつ,位置や方向の補間をおこなうアルゴリズムとして,本研究では,Dead Reckoning等で用いられる単純な線形補間法に加えて,エルミート補間法と方向一致法を考案し,これらを比較した.

図3において p_0 をデータ受信時刻 t_0 における遠隔ユーザの位置と方向の状態とする.状態 p_0 を用いて予測した時刻 t_1 の状態を \hat{p}_1 とする.また,時刻 t_1 における遠隔ユーザの実際の状態を p_1 とし, p_1 から予測した,次のデータ受信時刻 t_2 における遠隔ユーザの予測状態を \hat{p}_2 とする. p_1 と \hat{p}_1 のように,遠隔ユーザの予測と実際の状態に誤差が生じた場合には,誤差を修正するように, \hat{p}_1 から \hat{p}_2 に向けてアバタを移動させる必要がある.

(1) 線形補間法

最も単純な方法は文献[6,7]にもある線形補間法である.この方法では,アバタは確実に予測位置に到達するが,図3(a)のように \hat{p}_2 におけるアバタの進行方向(実線)は予測値(破線)に一致せず,アバタは急激な方向転換を伴う折れ線状の移動経路をとる.

(2) エルミート補間法

エルミート補間法は,図3(b)のように3次のエルミート曲線を利用することで,データ受信時刻 t_2 において,アバタの位置だけでなく,方向も予測値に一致させるものである.エルミート補間法は,位置と方向の両方の誤差を修正できる利点があるが,移動経路は3次の曲線となるため,アバタは蛇行することになる.

(3) 方向一致法

3番目の方法として,図3(c)のように,次のデータ受信時刻 t_2 におけるアバタの進行方向が,予測された進行方向と一致するように,進行方向を一定角速度で回転させる方法を考案した.しかし,この場合,位置誤差は解消されないため,アバタの位置を予測位置にむけて微小に平行移動させることで,位置誤差を漸近的に修正した.

現在時刻 t_1 におけるアバタ位置 \hat{p}_1 の座標を $(x_{\hat{p}_1}, z_{\hat{p}_1})$,速度ベクトルを $(Vx_{\hat{p}_1}, Vz_{\hat{p}_1})$,次のデータ受信時刻 t_2 における遠隔ユーザの予測位置 \hat{p}_2 の座標を $(x_{\hat{p}_2}, z_{\hat{p}_2})$,予測速度ベクトルを $(Vx_{\hat{p}_2}, Vz_{\hat{p}_2})$ とする.ここで,時刻 t_2 においてアバタの方向を予測方向に一致させるために,ア

バタの速度ベクトルが予測速度ベクトルに一致するような加速度を加える.その際に必要な加速度ベクトル (ax, az) は,次式で求められる.

$$ax = (Vx_{\hat{p}_2} - Vx_{\hat{p}_1}) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$az = (Vz_{\hat{p}_2} - Vz_{\hat{p}_1}) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

加速度 (ax, az) が加えられたときの,時刻 t_1 から時刻 t_2 の間の任意の時刻 t_i における,アバタの速度ベクトル (Vx_i, Vz_i) は下記のように求められる.

$$Vx_i = Vx_{\hat{p}_1} + ax(t_i - t_1) \quad (3)$$

$$Vz_i = Vz_{\hat{p}_1} + az(t_i - t_1) \quad (4)$$

このとき,時刻 t_2 におけるアバタ位置を p'_{p_2} とすると, p'_{p_2} の座標 $(x_{p'_{p_2}}, z_{p'_{p_2}})$ は下式で与えられる.

$$x_{p'_{p_2}} = x_{\hat{p}_1} + Vx_{\hat{p}_1}(t_2 - t_1) + ax(t_2 - t_1)^2 / 2 \quad (5)$$

$$z_{p'_{p_2}} = z_{\hat{p}_1} + Vz_{\hat{p}_1}(t_2 - t_1) + az(t_2 - t_1)^2 / 2 \quad (6)$$

しかし,方向を一致させるだけでは時刻 t_2 におけるアバタ位置 p'_{p_2} と遠隔ユーザ予測位置 \hat{p}_2 に誤差 $x_{\hat{p}_2} - x_{p'_{p_2}}$ が生じる.そこで,この誤差を漸近的に解消するように,平行移動による補正を加える.各時刻の補正アバタ位置 (x''_i, z''_i) は,下式で算出される.

$$x''_i = x_{\hat{p}_1} + Vx_i(t_i - t_1) + k(x_{\hat{p}_2} - x_{p'_{p_2}})(t_i - t_1) \quad (7)$$

$$z''_i = z_{\hat{p}_1} + Vz_i(t_i - t_1) + k(z_{\hat{p}_2} - z_{p'_{p_2}})(t_i - t_1) \quad (8)$$

このとき,補間中のアバタの方向 q_i は次式で計算できる.

$$q_i = \tan^{-1}(Vz_i / Vx_i) \quad (9)$$

k は位置誤差の補正係数であり $0 \leq k \leq 1.0$ の値をとる. $k < 1.0$ の時には図3(c)で示すようにアバタは予測位置 \hat{p}_2 に到達せず,補正アバタ位置 p''_{p_2} となる.したがって次の通信時刻までの補間は, p''_{p_2} と次の時刻の予測位置 \hat{p}_3 の間で行う.

また,(7),(8)式において, k が小さいと位置誤差が増大し, k を大きくすると補正量が大きくなりアバタが横

滑りして見えるためユーザに違和感を与える可能性がある。そこで、後述の心理物理実験の被験者とは別の被験者4人に対して、係数を0.2から0.5まで0.1刻みで変化させ違和感を聞き取る予備実験をおこない、全被験者でほぼ違和感が見られなかった $k=0.3$ とした。

方向一致法はアバタの位置を予測位置に漸近的に合わせるため、位置誤差は他の補間法より大きくなる可能性があるが、アバタの向きを予測方向に一致するように一定角速度で変化させるため、方向変動が小さい円滑なアバタアニメーションとなるものと期待される。

4. アバタの歩行アニメーション

歩行アニメーションを生成する方法には、運動学的方法[11,12]や逆運動学を用いる方法[13]、神経振動子を用いて歩行動作をシミュレートする方法[14]など、様々な方法が提案されている。しかし、複雑な力学モデルに基づくシミュレーションは、計算負荷が大きく、実時間で多数のアバタのアニメーションをおこなうことは困難である。また、本研究でのアバタアニメーションの目的は、共有仮想空間における遠隔ユーザの位置、速度、方向などを自然に認知させることであり、平地での前進歩行を想定しているため、力学的に厳密な歩行動作の再現は要求されない。よって、実歩行に基づく先験的知識を単純化した動作ルールに基づいてアニメーションを生成するルールベース手法を採用した。

4.1 アバタモデル

アニメーションを生成するためには、アバタの関節自由度や各部位の寸法を決定しておく必要がある。本研究では、図4および表1に示す12関節に対し、それぞれ矢状面のみ1自由度（屈曲/伸展動作）を設定した。各部分の寸法は、身長170cmの成人男子の寸法を計測し利用した。

表1 関節の構成

関節の種類
右肩関節
左肩関節
右肘関節
左肘関節
右股関節
左股関節
右膝関節
左膝関節
右足関節
左足関節
右中足指節関節
左中足指節関節

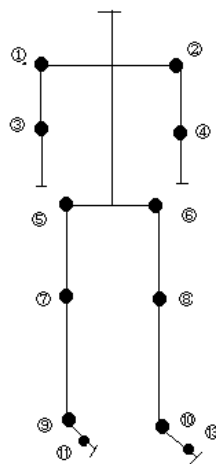


図4 アバタモデル

4.2 アニメーションルール

本研究では、まず取得した遠隔ユーザの体重心の移動距離から足位置を算出し、歩行速度に対して定義された数力所の関節位置を用いて、膝関節と股関節の角度を逆運動学的に求めた。また、足関節、中足指節関節角度および上肢の関節角度は、後述の歩行速度をもとに定義したパターンにしたがって決定した。

4.2.1 下肢の運動

本研究では、平田らの歩行速度と歩幅に比例関係があるとの報告にもとづき[15]、通信によって取得した速度から歩幅を決定した。

さらに、歩行動作を矢状面内での2次元運動とみなし、体重心は常に遊脚と支持脚を地面に投影した点の中点上にあると仮定すると、支持脚の位置が規定されていれば、体重心位置と支持脚位置から遊脚の水平方向位置を算出できる。本研究では、歩容決定のためのパラメータとして、歩幅 l と体重心移動距離 l_m を用いて歩行速度 p を式(10)のように定義した。

$$p = l_m / (l/2) \tag{10}$$

上式において l_m は、股関節角度が最大となる時刻を基準とし、基準時刻からの体重心の移動距離である。仮定より、1歩あたりの体重心の移動距離は歩幅の半分と見なされるので、歩行速度は $0 \leq p \leq 1.0$ の値を取る。また $p=1.0$ において支持脚と遊脚が入れ替わり、改めて $p=0$ となる。静止直立姿勢から歩行への遷移に際しては、直立姿勢を歩行速度 $p=0$ とし、最初の一步のみ、体重心の移動距離 l_m と歩幅 l を定常歩行時の50%にすることで整合性をとった。

また、ビデオを用いて成人男子の歩行を解析したところ、遊脚の高さは歩行速度とほぼ線形な関係が見られ、遊脚の高さが最大になるのは、歩行速度0.4近傍であった。さらに、遊脚相における足関節の最大高さは、歩行速度と正の相関関係を示す傾向が見られた。そこで、これらを線形近似した関係式を用いて、仮想空間移動速度に応じて、逐次遊脚の高さを算出した。足関節の位置が決定されると、膝関節位置は大腿と下腿の長さから幾何学的に決定される。中足指節関節角度は、歩行速度を基準とした角度変化パターンをあらかじめ用意しておき、それに基づいて変化させた。

4.2.2 上肢の運動

歩行中の腕の振りは、足の動きに同期した振子状の運動である。よって、足の動きである歩行速度 p を用いて、肩関節と肘関節の角度変化を正弦波状の経時変化パターンとして規定した。

以上のアニメーションルールに基づいて作成した、歩行アニメーションの例を図5に示す。

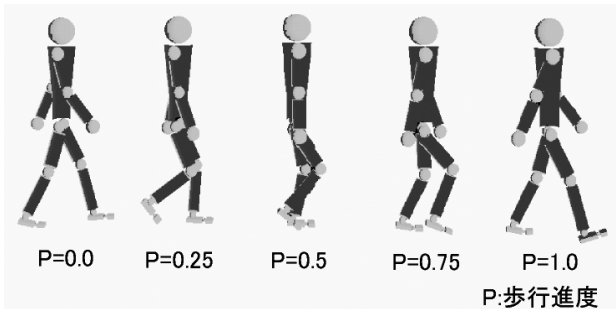


図5 歩行アニメーション

5. システム評価

5.1 サーバとクライアントの負荷評価

本研究で試作したシステムの通信負荷評価のため、CPU に Xeon-1.5GHz を 2 台使用したサーバならびに、100Base-T を用いた LAN で接続された計算機 10 台を用いて、多数ユーザ接続時の負荷を検討した。クライアント用計算機 1 台につき、OpenGL による描画部分のみを削除したクライアントソフトウェアを通信時間間隔 0.8 秒で 10 同時実行し、100 クライアント同時接続時のサーバ試験をおこなった。クライアントに配信されるユーザ情報を検討したところ、通信周期以上の遅延は見られず、100 クライアント接続時のサーバの正常動作が確認された。

また、クライアントにおいてアバタ 1 人の描画を 1 回おこなうための平均処理時間は、CPU に Athlon 1900+ を用いた計算機で、予測および補間時間が 9.3 μ s、動作生成時間が 6.6 μ s であった。50 人のアバタ描画を秒間 30 フレームでおこなったときの CPU 占有率は 2.4% となる。実際の描画には、計算機の描画処理能力に大きく依存するレンダリング時間が加わるが、ルールベースのアニメーションとすることで、予測と補間および動作生成の所用時間は、実用に支障がない程度となった。

5.2 予測法と補間法の誤差評価

5.2.1 実験方法

遠隔ユーザが空間移動インタフェースを用いて仮想空間を移動し、予測と補間によってアバタの歩行アニメーションを生成したときの、位置と方向の誤差とアバタの移動経路の滑らかさを評価した。ただし、実験の再現性のため、遠隔ユーザの歩行データはあらかじめ計測し記録したものを使用した。歩行路は、以下の 2 種類を使用した

緩やかな歩行路

- ・全長 110m で道幅 4 m
- ・30° 60° 90° のカーブが各 1 回、45° のカーブが 6 回の計 9 回

急激な歩行路

- ・全長 90m で道幅 4 m

- ・90° が 3 回、30° 45° 120° 135° 150° のカーブが各 2 回、60° のカーブが 1 回の計 14 回

通信間隔は 0.05 秒、0.1 秒、0.2 秒、0.4 秒、0.8 秒、1.6 秒、3.2 秒の 7 条件でおこなった。

5.2.2 実験結果と考察

図 6 は緩やかな歩行路、図 7 は急激な歩行路を歩行した時の、位置誤差と方向誤差の平均値である。

2 つの予測法を比較してみると、位置誤差の全条件平均値が 0.32m (線形予測) と 0.27m (曲率予測)、方向誤差の平均値はどちらも 5.6° であり、曲率予測法が線形予測法よりも、若干位置誤差が小さい傾向を示した。曲率の利用による誤差軽減量が 0.05m と小さく方向誤差の改善が見られないのは、予測法の説明で述べたように、計測誤差による身体方向の変動のためと考えられる。

次に補間法に関して見てみると、位置誤差はエルミート補間法で最も小さくなった。角度誤差は通信時間間隔によって傾向がばらつくが、曲率予測と組み合わせる場合には、方向一致法が比較的良好な結果を示した。

ここで、急激な歩行路で通信間隔 0.8 秒のときの、アバタ移動経路の曲率を図 8 に示す。曲率波形を見ると、線形補間法では曲率が急激に変化していて、円滑な移動をしていないことが分かる。また、エルミート補間法は、線形補間法よりも元の歩行データに近いものの、曲率の変化が大きい。この 2 つに対し、方向一致法の曲率波形は他の補間法よりも滑らで、元の歩行データに近いものが得られた。

以上を総合して考えると、予測法は曲率予測法が位置誤差の点で若干有利で、補間法は、位置と角度の誤差量が他の補間法より若干大きいものの、ユーザへ違和感の少ないアニメーションを提示することを考えて、滑らかなアバタ歩行を実現する方向一致法を用いるのが有効であると考えられる。ただし、いずれの補間法でも、位置誤差は緩やかな歩行路で 0.1m 以上あるため、二人三脚のように寄り添って歩くことは困難である。しかしユーザ同士と一緒に散歩をするような、位置の精度があまり要求されないコンテンツには有効と考えられる。

また、通信間隔と誤差量の関係を見ると、通信間隔が 0.8 秒より短い範囲では、誤差量に大きな違いは見られず、通信間隔が 1 秒より長くなると、通信間隔の増加とともに誤差が増加する傾向が見られた。通信間隔 0.8 秒未満の範囲で、誤差が減少しない理由は、短い通信間隔では、空間移動インタフェースの身体方向検出誤差の影響を強く受けるためと考えられ、これは既に述べたように、実測値であるため基本的に避けたい。よって、位置と角度の誤差量とネットワーク負荷を考慮すると、試作システムでは通信間隔は 0.5 秒

から 0.8 秒程度が望ましいと考えられる。

通信時間間隔は、Dead Reckoning において提案されているように、システムで設定せず、送信側で予測誤差を算出して誤差が一定値以上になったら送信する方法なども考えられるが[7]、評価実験の結果を見ると、通信間隔が 0.8 秒を超過すると予測誤差も増大するため、空間移動インタフェースを使用した実歩行データの通信における有効性は低いと見られる。また、インターネット環境では、一定時間間隔での通信は、遠隔ユーザの存在確認に利用できるという利点がある。

5.3 心理物理実験

遠隔ユーザの歩行動作をアバタを用いてアニメーション表示することによりコミュニケーションを補助する場合、そのアニメーションが不自然であっては目的に反する。そこで、実際に複数のユーザに仮想空間内を歩行させ、各予測法と補間法の組み合わせで描画されるアバタアニメーションの違和感を、一対比較法を用いて比較した。

5.3.1 実験方法

被験者には、あらかじめ記録しておいた別ユーザの歩行データをもとに遠隔ユーザのアバタを呈示し、その後を追従させた。さらに、アバタの予測補間法を変えて同じ課題をおこなわせ、アバタの歩行が「不自然に見える方」を選択回答させた。試行数は、予測法と補間法を組み合わせた 6 種類の条件で、すべての組み合わせ各 1 回の比較課題をおこなったので、被験者あたり 30 試行(15 回の一対比較)である。歩行路は、前出の緩やかな歩行路と急激な歩行路の 2 種類である。通信間隔は、誤差評価実験の結果を踏まえ、0.8 秒とした。被験者は健常成人男性 7 名とし、順序効果を避けるため被験者ごとに実験順序を変えた。

5.3.2 実験結果と考察

一対比較の結果を間隔尺度に直したものを図 9 に示す。値が大きいほど、被験者が感じた違和感が大きいことを意味する。予測法に関して結果を見てみると、緩やかな歩行路、急激な歩行路とも、最も違和感が小

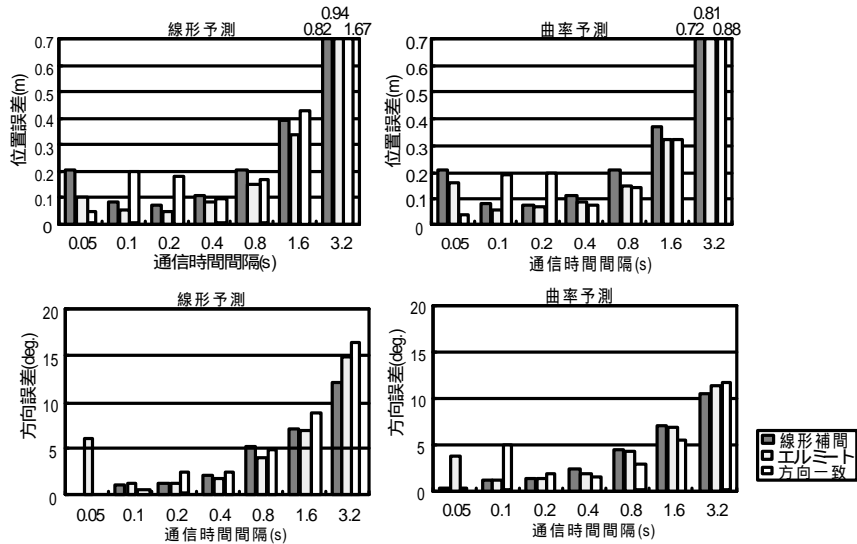


図 6 位置，方向の平均誤差量（緩やかな歩行路）

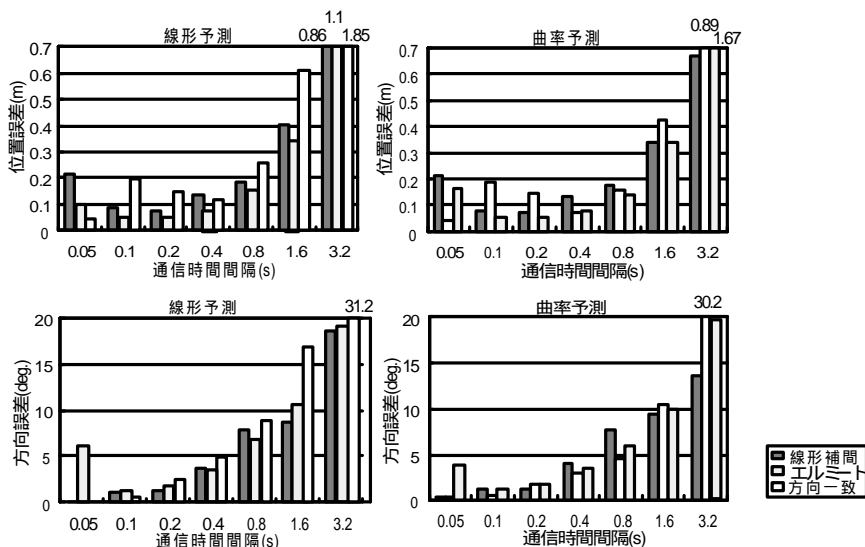


図 7 位置，方向の平均誤差量（急激な歩行路）

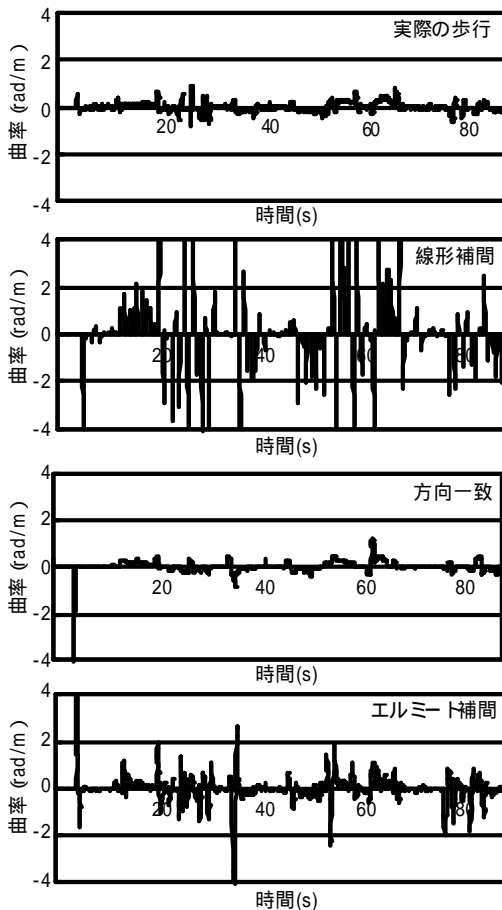


図 8 遠隔ユーザとアバタの歩行経路の曲率 (急激な歩行路)

さいのは方向一致法で、エルミート補間法と線形補間法は同程度であった。特に、方向転換の回数が少なく角度変化も小さい緩やかな歩行路では、違和感の差がより顕著に見られた。歩行路や被験者による回答のばらつきは見られたが、大きく回答の傾向が異なる被験者は特に見られなかった。補間法と違和感の関係は、図 7 の移動経路の曲率波形と同一の傾向であり、線形補間法とエルミート補間法ではアバタの方向が頻りに変化して違和感を感じる、という被験者の内観とも一致する。

また、予測法による違いについて見てみると、補間法ほどには計算法による差は見られないが、緩やかな歩行路と急激な歩行路の両条件とも、位置誤差と方向誤差が大きい線形予測のほうが曲率予測よりも若干違和感が小さいという結果となった。すなわち、アバタを用いた遠隔ユーザの歩行アニメーションにおいて違和感を軽減するためには、予測誤差の低減だけでなく、進行方向の変動の抑制が重要であることが示唆された。

6. まとめ

本研究では、足踏式移動インタフェースを用いて、クライアント/サーバ方式の多人数参加型共有仮想空

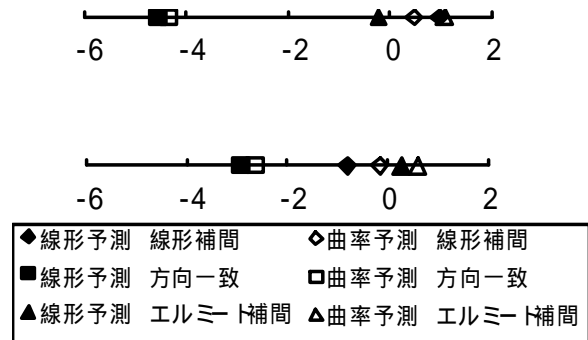


図 9 アバタアニメーションにおける違和感の間隔尺度(上:緩やかな歩行路,下:急激な歩行

間歩行システムを試作した。低頻度のユーザ情報通信とルールベースのアバタアニメーションによって、実時間で共有仮想空間歩行が実現された。また、低頻度通信での円滑なアバタアニメーションのための補間法として“方向一致法”を提案し、線形補間やエルミート曲線を用いた補間法と比較して、違和感の少ない歩行アニメーションが得られることを確認した。

在宅リハビリテーションシステムなどの応用に向け、仮想空間データの動的更新や音声通信機能、アバタのジェスチャ機能などを実装することにより、共有した仮想空間を自由に歩行してコミュニケーションできるシステムを実現することが今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度によるものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] J.Cassell and H.Vilhjalmsson, “Fully embodied conversational avatars: making communicative behaviors autonomous”, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2(1), 45-64(1999)
- [2] 河野, 山本, 本田, 鈴木, 石橋, “没入型共有コミュニケーション環境”, *情報処理学会研究報告グループウェア*, 35, 13-18(2000)
- [3] 小木, 山田, 玉川, 廣瀬, “共有没入空間におけるビデオアバタを用いた位置関係表現”, *電子情報通信学会論文誌, J82-DII(10)*, 1826-1834(1999)
- [4] 野間, 矢野, 宮里, 岩田, “ネットワーク接続された歩行感覚提示装置による協調歩行感覚の提示”, *インタラクティブ 2000 論文集*, 147-148(2000)
- [5] 矢野, 葛西, 斉藤, 岩田, “ロコモーションインタフェースによる歩行感覚の共有”, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 4(2), 27-34(2002)
- [6] M.R.Macedonia, M.J. Zyda, D.R.Pratt, P.T.Barham and S.Zeswitz, “NPSNET: A network software architecture for large scale virtual environment”, *Presence*, 3(4),

265-287(1994)

- [7] DIS. 1278.1 IEEE standard for distributed interactive simulation- application protocols, ANSI (1995)
- [8] 雨宮, 八木, 塩崎, 藤田, 渡部, “足踏式空間移動インタフェース(WARP)の開発と評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 6(3), 221-228 (2001)
- [9] 笠羽, 藤田, “足踏式空間移動インタフェース WARP の開発 - 方向転換機能の付加 -”, 日本バーチャルリアリティー学会第6回大会論文集, 83-86(2001)
- [10] M.Wray and V.Belrose, “Avatars in Living Space”, Proceedings VRML99 Forth symposium on the virtual reality language, 13-19(1999)
- [11] D.Zeltzer, “Motor control techniques for figure animation”, IEEE Computer Graphics and Applications, 2(9), 53-59(1982)
- [12] A.Bruderlin and T.Calvert. “Goal-directed dynamic animation of human walking”, Computer Graphics, 23(3), 233- 242 (1989)
- [13] H.Ko and J.Badler, "Animating human locomotion with inverse dynamics", IEEE Computer Graphics and Applications, 16(2), 50-59(1996)
- [14] 栗山, 栗原, 金子, “神経振動子を用いた歩行アニメーションの自動生成”, 電子情報通信学会論文誌, J84-DII(11), 2427-2436(2001)
- [15] 平田, 江島, 石井, 原田, 佐藤, “足踏み動作解析に基づくウォークスルーのための速度制御”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 2(4), 293-302(2000)

(2002年11月1日受付)

[著者紹介]

下地 崇 (学生会員)



2002年東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科卒業。現在同大学院博士前期課程在学中。ネットワークを介した空間共有とコミュニケーションの研究に従事。

藤田 欣也 (正会員)



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学, 東北大学医学部, 岩手大学を経て, 現在東京農工大学工学部助教授。力触覚や空間移動インタフェースに関する開発と評価, ならびに医用福祉工学に関する研究に従事(工学博士)。