

基礎論文

能動的歩行動作に対応した歩行感覚提示装置の開発

野間 春生 宮里 勉 中津 良平

Development of Locomotion Interface for Active Self Motion

Haruo Noma Tsutomu Miyasato Ryouhei Nakatsu

Abstract - In this paper, we focus on the sense of locomotion, in particular, the sense one feels while walking in a large space. Walking is the most basic way of moving around, and a lot of information can be obtained by doing so, e.g., sensing, hardness, humidity, and so on of the space. The locomotion interface we have developed is named ATLAS (ATR Locomotion interface for active self motion). Our design goal was to eliminate the need for a walker to "learn" how to walk and for equipping the walker with obstructive sensors. We employ a treadmill approach for ATLAS. In the initial trial state, ATLAS can estimate the working speed from the walking motion visually, and control the speed of a belt to synthesize the real feeling of walking in a virtual space. First, we describe related works of locomotion interfaces and our design. Next, we show the method utilized for motion analysis and how to control the belt speed. Finally, we conclude with a description of our first trial ATLAS and the experimental results.

Keywords: Virtual Reality, Locomotion, Communication, Computer Vision

1. はじめに

現実のコミュニケーションにおいて、事実関係の伝達に主眼が置かれる会議等では単に情報の伝送だけでも目標は達せられる。しかし、言葉の意味を正確に知るには文脈やその背景の文化を理解する事が必要である様に、人と人の日常のコミュニケーションにおいても、お互いの意図や感情を理解するには単に相手から発せられる言葉やイメージの情報だけでなく、対話者がいる環境及びそれぞれが体験した情報が重要であると考えられる。

そこで、我々は日常のコミュニケーションの新しい手段として、利用者がVR技術を活用し、相手の環境に入って対話を行なう"Tel-E-Merge"環境について提案してきた[1]。Tel-E-Merge環境下での対話の場は図1に示すように、ある対話者の存在する環境であり、その環境に存在するTele-Inviterは他の対話者をTele-Visitorとして自身の環境に引き込む。Tele-Visitorにとっては対話の場はVR技術によって擬似的に構成されることになり、Tele-Existenceとして提案される技術の延長である。Tel-E-Merge環境の重要な点は、Tele-Inviter環境へ入り込んでくる他の参加者の存在感提示、つまり、発せられる情報を交換するだけでなく、情報を発する主体自体の存在感の伝達に着目する対話手法と言える。

究極的には、完全な存在として原寸大のアンドロイドをTele-Visitorとして動作させれば、Tel-E-Merge環境は実現されるが、現実には実装は多難であろう。そこで現実的な解として、われわれは存在感のみを伝える要素について検討を進めている。

ここではその一つ的手段として遠隔地に離れた対話者が一緒に歩行しながら対話可能とする手法に焦点を当てた。"一緒に会話しながら歩く"という行為は実に日常的な対話手段であるが、実際には単に会話するだけでなく、障害

物を巧みに回避しながら、無意識に歩行のペースを対話者双方が調和させる複雑なタスクであり、いわば、通常の会話に比べて非常に緊張感の高い環境にあると考えられる。それだけに、各対話者の歩行動作自体は遠隔地で独立になされていたとしても、映像と会話のチャンネルと同時に、お互いの歩行を協調させるチャンネルを仮想的に実現することで、一緒に歩行している対話者の存在感提示が期待できる。

この手法の実現のために、まずTele-Visitorのためのデバイスとして仮想空間を歩行移動可能とする歩行感覚生成装置(Locomotion Interface以下ではLI)が必要となる。これまでに実用的に歩行シミュレタが実現された例は少ない。その理由は、従来の移動機器のシミュレタは人間・装置間の情報の流れが機器を介するために単純であり計算機処理が容易であったが、歩行移動では人体の挙動と移動の対応付けが複雑なためである。

本報告では、歩行者には特別な訓練や歩行動作を阻害するセンサー・アクチュエータの装着が必要ないLIの実現を目指し、試作機"ATLAS: ATR Locomotion Interface for Active Self-motion"を実装した。以降ではまず関連研究と

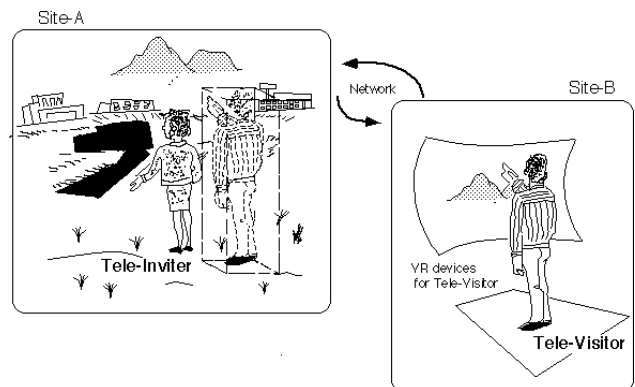


図1 Tel-E-Mergeによるコミュニケーションの概念
Fig. 1 Conceptual image of Tel-E-Merge

ATLASの設計目標に触れ、次に実現に必要な歩行速度を人間の歩行動作の解析結果の考察から推定する手法について述べる。さらにトレッドミルを用いたATLASの試作機についてまとめ、これを用いた実験結果を示す。最後に現状の問題点と今後の計画についてまとめる。

2. 関連研究とATLASの設計方針

LIをここでは特に”ユーザが自身の歩行動作によって仮想空間の移動感覚を得る装置”と定義し、まずこれまでの関連研究を歩行移動時に生じるユーザーの動きを相殺する手法に従って分類を与え、ついで我々の提案手法の目標と設計方針についてまとめる。

2.1 Locomotion Interfaceの分類

2.1.1 トレッドミル型

トレッドミル型はベルト機構によりユーザの歩行動作を相殺する手法であり、ユーザにアクチュエータを装着する必要がない。ベルトの駆動方式から大別してユーザの重力分力で駆動するパッシブ型とユーザの動きに連動するアクチュエータでベルトを制御するアクティブ型に細分できる[2]。前者の場合は機構が単純となるが、対象となる世界が常に平面のみで構成される場合に限定される[3,4]。後者の場合は逆に斜面や柔軟な平面などを再現可能であるが、動作計測とアクチュエータの駆動系が必要となり機構が複雑化する[5]。

トレッドミル型のもう一つの問題点に、歩行方向がベルトの運転方向に限定される点が挙げられる。多くの場合はハンドルや上体、あるいは頭部の方向による方向指示手段を併用している。一方で、DarkenらのOmni Directional Treadmill[6]、岩田らのTorus Treadmill[7]では2方向ベルトを構成する手法で、EyreらはSpherical Projection System[8]で巨大な半球殻内に歩行面を生成して、2次元平面の任意方向への移動を実現している。

2.1.2 FootPad型

FootPad型は歩行者の足先動作に追従する複数の可動板によって運動を相殺する手法である。LathamはOmniTrek[9]とよばれるユーザーの足先を常に追尾する4自由度の可動板を2機用いて歩行面を再現する手法を、RostonらはWhole Body Display[10]において雪面などの提示を目指した装置を提案している。いずれも、高い周波数応答と高剛性リンク機構が必要となる。

2.1.3 Slide型

歩行面を固定し、ユーザ側に相殺機能を持たせる例として、岩田らのスライド式インタフェースの提案がある[2]。ここではユーザの足の裏に車輪、あるいは、摩擦係数の低い素材を取り付けた特殊な靴によって実現した。ユーザの上体の固定には特殊ハネスや円形の手摺状の保持機構を採用した。

2.1.4 ペダル型

動作計測を単純化するために歩行動作の自由度を下げ、歩行に近い動作によって移動感覚を生成する方法として、ペダルを用いる手法も採られている。Darkenらは海兵隊

員の訓練のためにUniPort[6]と呼ばれる固定された一輪車形状装置を提案した。さらに自転車そのものにセンサをとりつけ、インタフェースとして用いる例も幾つか提案されている[11,12]。

2.1.5 その他の方式

さらに単純化を進め、歩行動作に類似した動きによって仮想空間内の移動操作を行なう手法も数多く提案されている。Choiらは靴底に4個の圧力センサを備え、圧力センサの時系列出力を処理して足踏み動作を検出するCyberBoot[13]を開発した。門林らのVISTA Walk[14]ではCCDカメラによって捉えたユーザの位置情報によって移動方向と移動速度を検出し、大画面によって仮想空間映像を提示する。小林らはユーザの体重移動によってわずかに傾く円盤形状のTilting Disc[15]によって重心位置を検出し、これを移動方向と移動速度にマッピングして仮想空間移動を行なう装置を提案した。

2.2 ATLASの設計目標

本論文では、冒頭で述べた”Tel-E-Merge”環境における双方向コミュニケーションのためのインタフェース装置である歩行感覚提示装置ATLASの開発について述べる。ATLASは自然な歩行動作を阻害するセンサやケーブルの装着を最低限とした仮想空間移動手段の実現を目標とし、ユーザーの歩行動作を相殺する機構として図2のようなモーションプラットフォームと電動トレッドミルから成る。ATLASではユーザの前進移動をトレッドミルによって相殺し、歩行方向の変更動作にはモーションプラットフォームでベルト面全体を回転させることで対応する手法を採用する。プラットフォームは同時に歩行面の傾きや硬さなどの歩行面のテクスチャーの表現に用いる事も目指している。

本論文では、特にATLASの基本機能である停止状態から歩行限界速度までの歩行動作を相殺可能なベルト速度制御手法について述べる。

3. 非接触手段による歩行動作の計測

歩行者が任意の歩行動作を行なった際に、トレッドミル

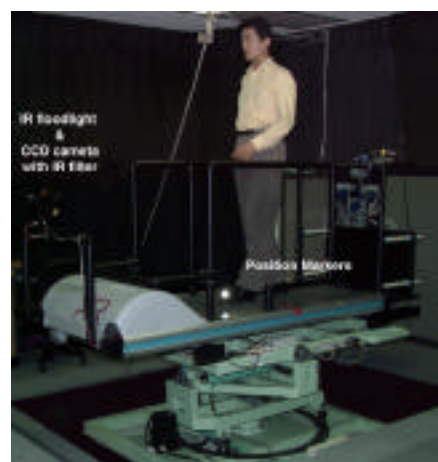


図2 試作ATLAS
Fig.2 The first trial ATLAS

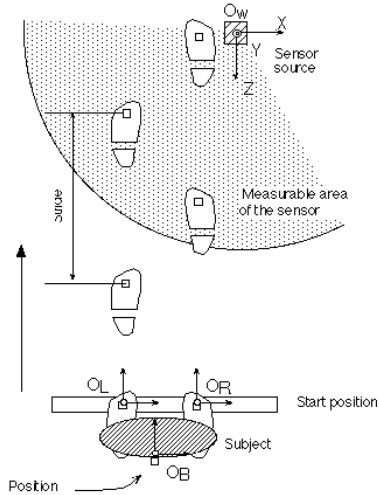


図3 歩行動作計測実験環境
Fig. 3 Experimental setup

上の定点に歩行者を保持すべくベルト速度制御を行なうためには、歩行速度の変化に完全に追従して逆方向にベルトを回転させねばならない。しかしトレッドミル歩行ではベルトとの相対的な関係のために歩行速度の直接計測は困難である。また、制御においては計測誤差や制御遅れにより、何らかの位置情報フィードバックも不可欠である。

これまでの人間工学研究では、光学的手法や圧力プレート、加速度センサなどを用いて歩行者の歩行状態を計測する手法が各種提案されている[16-21]。しかし、それらの多くは実装の問題や歩行動作の阻害する等の理由から前章で述べた設計目標を満たすには不相当であった。

そこで、本研究では非接触計測可能な光学的な歩行運動パターン計測からトレッドミル制御に必要な情報を得ることを目指し、まず通常の歩行動作と歩行位置、及び、歩行速度の関係について計測し、考察を行なった。

3.1 通常歩行動作の計測

計測は図3に示す様に、非金属床の室内に約5mの直線歩行路を設定し、磁気式位置姿勢センサを用いて両足先部と重心位置とみなした腰部の床面上での位置を120Hzで計測した。被験者は30才前後の成人6名であり、遅く、普通に、早く歩行するよう指示し、各速度3回の試行、合計で54試行について計測した。歩行速度の統制はメトロノームのテンポ音を用いた。ただし実験ではテンポ音によって歩行の周期はほぼ統制できたが、歩行速度については個人差が大きく被験者間での統制は取れなかった。

図4に横軸を時間、縦軸を進行方向の位置として、腰部と両足先位置の運動の典型的計測結果を示す。この時系列データから磁気センサの直径約3mの有効計測範囲内について、歩幅 S 、立脚時間 t_1 、遊脚時間 t_2 を読み取った。なお、歩幅とは図3に示す様に一方の足が離床してから着床する間の距離であり、遊脚時間とは離床してから着床する間の時間、立脚時間とは着床してから離床する間の時間と定義した。それぞれは図4に示す様に足先の運動停止状態を基準に定義し、各試行毎に平均をとった。

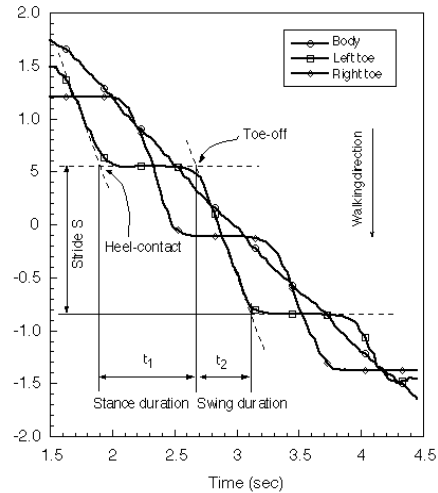


図4 歩行時の腰部および両足先位置計測結果
Fig. 4 Estimation of walker's position

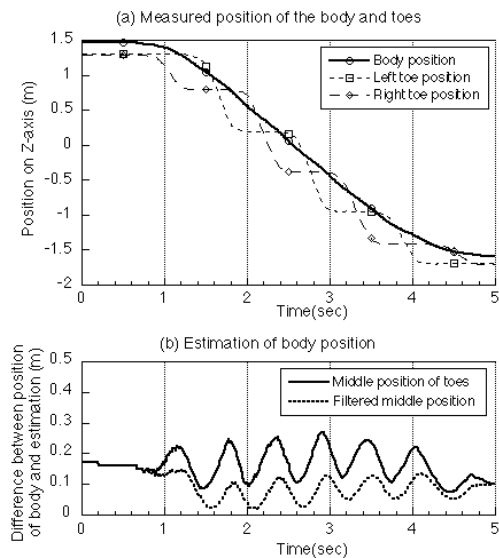


図5 歩行者の腰部位置の推定結果
Fig. 5 Estimation of walker's position

3.2 歩行位置の推定

歩行中の重心位置を足先の運動パターンから推定する手段として両足先位置の midpoint を重心とする手法を検討した。典型的な結果として、図5-aに磁気センサにより計測された被験者の腰部位置と両足先位置の移動の様子を、図5-bに腰部位置に対する推定値の誤差をそれぞれ示す。ほぼ直線的に時間変化する腰部位置に対して、推定値として算出した midpoint の動きには15cm程度のオフセットと歩行に連動した振幅約10cmの振動が観測された。オフセットはセンサ取り付け位置の差によって生じているものであり問題とならない。一方、振動についてはカットオフ0.2HzのLPFを midpoint 位置結果に作用させたところ、振動の振幅が半分約5cmに押さえられた。4章で述べる試作機ではこの手法によってトレッドミル上の歩行者位置を推定している。

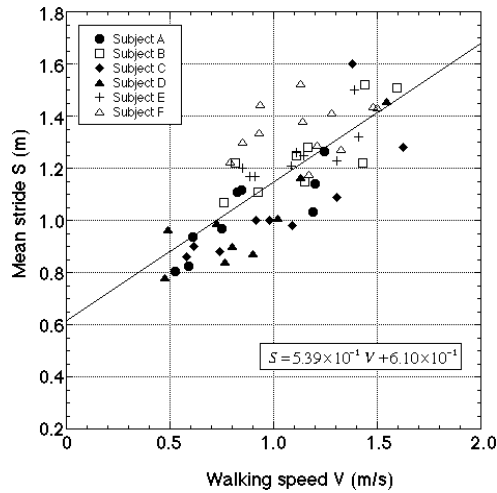


図6 歩行速度と歩幅の相関結果
Fig. 6 Walking speed vs. Stride

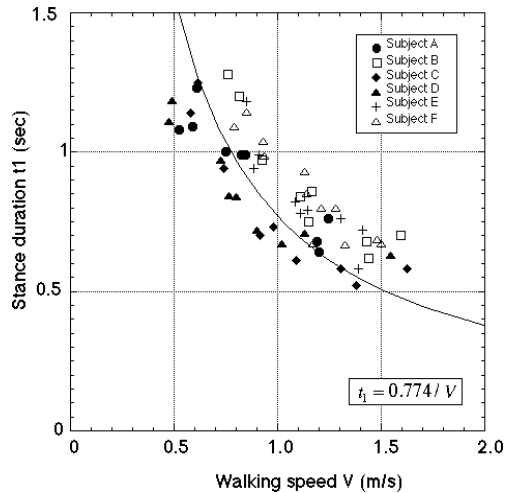


図8 歩行速度と立脚時間の相関結果
Fig. 8 Walking speed vs. stance duration

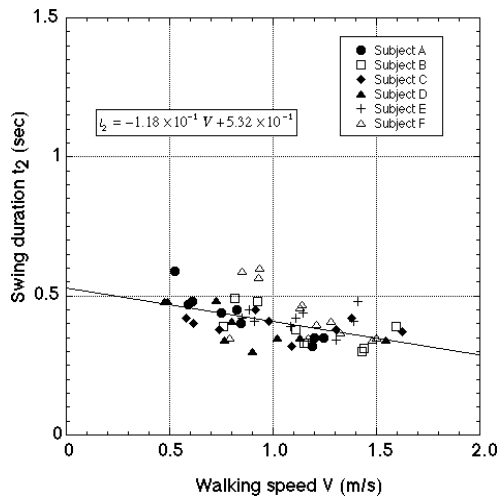


図7 歩行速度と遊脚時間の相関結果
Fig. 7 Walking speed vs. swing duration

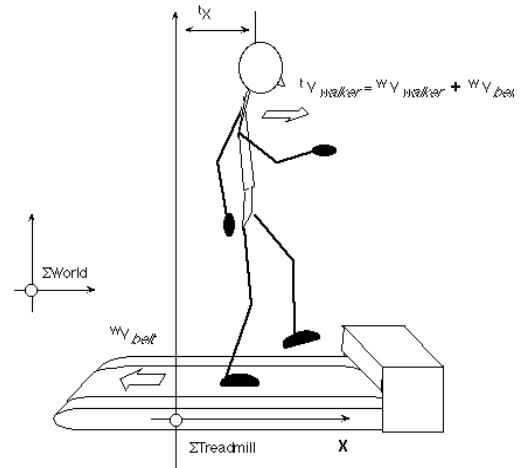


図9 試作ATLAS上での歩行運動
Fig. 9 Dynamics of ATLAS

3.3 歩行速度の推定

足先の運動パターンから歩行速度を推定するために、歩行速度と歩幅、立・遊脚時間の関係を調べた。まず図6に歩行速度と歩幅の関係を示す。各マーカーは被験者を示し、実線は1次回帰直線である。この結果から一見すると、歩幅と歩行速度には比例関係が認められるが、被験者毎には速度に対してそれほど大きな歩幅の変動はなく、むしろ検定からは歩幅に対して被験者間要因が認められた($F(5,48)=8.13, p<0.001$)。

次に、足を前方に振り出す歩行相である遊脚時間と歩行速度との関係については、図7に示す様に遊脚時間が歩行速度に対してわずかに負に比例する傾向が見られる。計測誤差を考慮すると、ここでの目的である歩行速度と遊脚時間の相関からの速度推定には不適である。

一方で、足が接地したまま体に対して後方に移動する歩行相である立脚時間については、図8に示す様に歩行速度

と反比例の関係が得られた。歩行速度をV、立脚時間を t_1 として回帰すると、

$$t_1 = 0.774 / V \quad (1)$$

となる。またF検定の結果から立脚時間に被験者間要因は見られなかった ($F(5,48)=0.54, P<0.74$)。

以上の結果より、立脚時間に対する歩行速度の対応は歩幅との対応に比べて個人差が少なく、また、遊脚時間との対応に比べ低速歩行から高速歩行まで精度面で余裕があると考えられる。従って、以降の試作機においては立脚時間から歩行速度を推定する手法を採った。

4. 歩行動作に対応したベルト速度制御手法

ここでは3章の結果を応用し、歩行動作を全く阻害しない反射マーカーを歩行者の足先に取り付けるだけで、停止状態から走行寸前までの任意の歩行動作に対して歩行

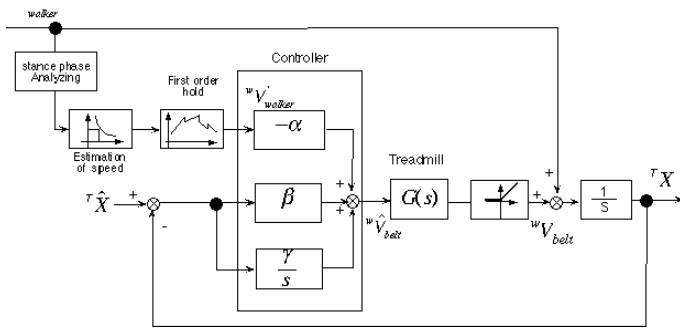


図10 ベルト速度制御系のブロック線図
Fig. 10 Block diagram of the belt system

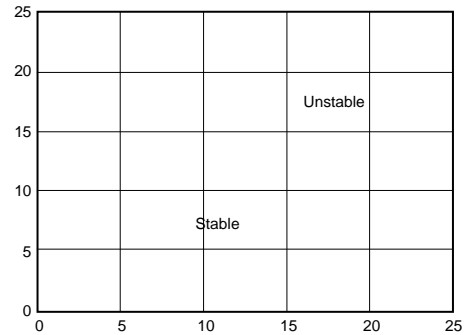


図11 フィードバックパラメータの安定領域
Fig. 11 Feedback parameters for convergence

位置を一定に保持可能なトレッドミルのベルト速度制御手法について述べる。以降の議論では、適当な手段によって歩行者のベルト上での位置計測と遊立脚時間判定が実施されているものとする。なお、この機構の試作機での実現手法は次章で述べる。

制御目標は、図9に示す様に、 ${}^wV_{belt}$ をベルトの回転速度、 ${}^wV_{walker}$ を歩行速度、 ${}^T X$ を歩行者のベルト上での位置とした際に、歩行者が任意の歩行動作に対しても ${}^T X$ が常に一定位置となるように ${}^wV_{belt}$ を制御することである。また、歩行速度が変化した際に生じるオフセットの収束の過渡応答は、歩行者の転倒を防止するために、

- ・非振動的で素早い収束
- ・ベルト速度の最大加速度制限

の2条件を満たさねばならない。

これらを目標として実装した速度制御系のブロック線図を図10に示す。ここでは、推定歩行速度によるフィードフォワードを基本とし、その推定誤差を吸収するために推定重心位置によPIフィードバックを付加した。図中の記号は、 ${}^w\hat{V}_{belt}$ はベルトへの速度指令、 t_1 は観測される立脚時間、 ${}^w\hat{V}_{walker}$ は推定歩行速度、 ${}^T\hat{X}$ は位置指令値、 α, β, γ は各ゲイン値、 $G(s)$ はベルト速度のプロセスモデルである。

各制御指令のゲインは前記の条件に沿って設定する。 ${}^T\hat{X}$ を原点として常に0とすれば、入力を ${}^wV_{walker}$ として、応答は以下のように記述される。

$${}^T X = \frac{1}{s} {}^wV_{walker} + G(s) \left(\alpha {}^w\hat{V}_{walker} + \beta {}^T X + \frac{\gamma {}^T X}{s} \right) \quad (2)$$

フィードフォワードゲインの α は理想的には $G(s)$ の逆関数とすべきである。しかし、現実には、歩行速度は連続的に計測されないため、立脚時間からの推定値の1次ホールドである。従って、原理的に推定誤差と最大1ステップ分の推定遅れ、さらに機構部の応答遅れが不可避であるためにそのままでは発振の恐れがある。また、推定部分の非線形要素により最適解を解析的に算出するのは困難である。

そこで、試作機では振動を発生しない範囲で最大に調整

し $\alpha = -0.6$ 程度とし、この処理により生じるオフセットを位置フィードバックによって相殺する。ここでは典型的な位置に関するPI制御を採用した。P要素のゲイン β とI要素のゲイン γ の設計においては ${}^wV_{walker}$ を外乱とみなし、フィードバック部分の安定性から議論する。まずフィードバック部分の特性方程式が式(3)となる。

$$1 + \left(\beta + \frac{\gamma}{s} \right) G(s) \frac{1}{s} = 0 \quad (3)$$

ここでは $G(s)$ を実測し、以下のように一時遅れと時間遅れで記述し、さらに遅れ要素をPade近似する。

$$G(s) = \frac{e^{-0.09s}}{1 + 0.1s} = \frac{1}{1 + 0.1s} \frac{1 - 0.045s}{1 + 0.045s} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入し、ラウス安定判別により、 β と γ の安定領域を図11のように得た。

過渡応答を考えると、 β を大きくすれば立ち上がりが素早く応答し、 γ が大きくなれば収束が早まるが、これらを大きくするにつれて応答が振動的になる。 α と同様に最適解の解析は困難であり、図11の結果を元に条件を満たす範囲でパラメータを調整する。実機では $\beta = 6, \gamma = 5$ 程度までは非振動的に歩行位置が収束した。

また、フィードフォワード要素の有無での過渡応答を実機で観察すると、 $\alpha = 0$ の場合でもステップ入力から位置誤差のピークまではほぼ同一の過渡特性を示すが、ピークからの原点位置への収束には $\alpha = -0.6$ とする場合の応答と比べて数秒の遅れが観測された。フィードバック要素だけでこの時間差を解消するには応答が振動的となるため、結果的に歩行者位置が振動的に前後して歩行動作自体に支障が生じる。

5. 試作ATLASの実装

5.1 試作ATLASの構成

試作機の構成を図12に示す。ここではトレッドミル先端に固定したCCDカメラで両足先を撮影し、画像処理によって足先の運動パターンを得る。CCDカメラに

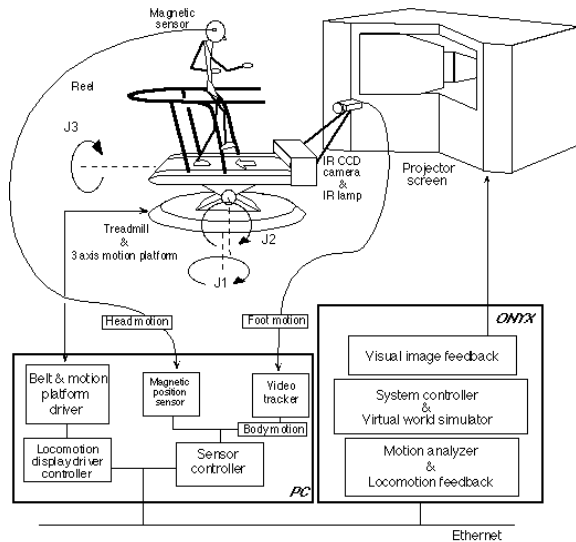


図12 試作ATLASの構成
Fig. 12 Overview of trial ATLAS

は赤外線フィルターをかけ、ほぼ同軸に赤外線投光ランプを配置する。これにより歩行者の足先に反射マーカーク張り付けるだけで、CCDカメラから得られる映像ではマーカークの輝度のみが高く、背景であるベルト面からマーカーク抽出のための二値化処理が安定してなされる。

また、光学的計測で厳密に足先位置の3次元位置計測を行うには最低二地点からの計測が必要であるが、ここでは簡略化のために歩行者の足先はほぼベルト面上を動くとして、カメラを1台で計測した。CCDカメラの映像は画像処理装置に送られ、両足先位置のベルト上での位置としてPCに入力される。この位置情報から再現される運動パターンとベルト回転速度との比較から、両足の立脚・遊脚の判定がなされ、これから前章で述べた方法によりベルト速度指令を行う。

ATLASで採用したトレッドミルは商品に改造を加えたもので、PCの指令で最高4.0m/sまでベルト速度を制御し、同時にベルト回転計測が可能とした。歩行可能領域は1450mm(D) x 550mm(W)で、速度指令に対する応答遅れは約0.1secであった。ATLASではこのトレッドミルを3軸回転可能なモーションプラットフォーム上に設置し、歩行面を任意角度に傾ける機能を有している。

今回の試作機でのPCはATLASの機構部のIOとして機能し、実際の歩行動作解析やベルト速度指令制御はEthernetを介して接続されるONYX(SGI)によって実行される。ATLASの一応用例であるCGで構成される仮想都市等のWalk ThroughシミュレーションもONYX上で実行可能である。I/Oを管理するPCの処理速度はCCDカメラの画像更新速度である60Hzで実行されており、ONYXでの歩行動作解析とベルト速度制御もこの情報更新速度に連動している。

また、ここでは実装例として140inchプロジェクターによる画像提示機能を付加しているが、より臨場感を求める際にはHMD、あるいは、CAVE等の多面プロジェクターとの組み合わせも容易である。また磁気位置セン

サーによる頭部位置計測についても、光学的なより負担の少ない無線計測手段の採用も可能である。

5.2 ATLASでの歩行動作計測

トレッドミルでの歩行は速度変更の際の不自然な慣性力の作用、あるいは半受動的な歩行であることから、物理的にも心理的にも通常の床面歩行とは異なる側面を有する[22]。そこで3章で述べた床面での歩行速度推定法がトレッドミル歩行でも利用可能であることを示すために、ATLASを用いて同様の計測を行った。

計測は通常のトレッドミル使用形態と同様にベルト速度を一定とし、このベルト上をほぼ一定位置で被験者に歩行させ、ATLASのCCDカメラによる歩行動作計測機能を用いて歩幅計測と遊脚判定を行った。実験は先の実験と同じ被験者6名により、歩行速度を0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 1.8(m/sec)として、各速度で10歩分のデータを記録し、図13,14,15には3章の結果と同様の形式で各試行の平均値を示す。図中のマーカークは先の実験と同じ被験者を示す。実験条件より各試行の歩行速度は完全に統制されているとみなした。実線はトレッドミル歩行での回帰結果であり破線は3章での床面歩行実験での回帰結果である。

床面歩行と比較して、歩幅、遊脚時間、立脚時間の全てにおいて歩行速度との関係はほぼ同様の傾向は得られた。立脚時間が短縮し遊脚時間が増加している点については、計算機による遊・立脚判定の信頼性向上のために立脚判定を厳しく設定したため、先の実験とは立・遊脚の判定基準が異なることに起因する。同様の理由から歩幅が短縮されている結果についても説明される。

この結果から、ATLAS上での歩行動作においても、立脚時間を計測する事で歩行速度を計測する事が示された。試作機においては、ここで得られた立脚時間 t_1 と歩行速度 V の回帰式である

$$t_1 = 4.6 \times 10^{-1} V^{-1.2} \quad (5)$$

を用いて実装した。

6. 追跡歩行タスクによる評価実験

提案手法によって歩行者が任意に歩行速度を変更可能であること、及び、システムによって歩行者がベルト上の目標位置に保持されていることを実験により示した。

6.1 実験手法

実験条件を統制するために、あるターゲットの後を被験者が同じ速度で追いかけるタスクを課した。図16に示すように、被験者正面に設置された70inchスクリーン上に追跡対象と歩行者の位置を示す2つのブロックを表示する。実験開始に伴って画面下部に停止していた対象ブロックが上方に移動を始める。これに合わせて被験者が歩行を始めるとその歩行速度に連動して他方のブロックも上方に移動する。対象ブロックの動きはシステムによって管理されており、実験開始後、5秒後に対象ブロックが0.8m/secで移動を開始し、20秒経過した時点で1.6m/secまで加速する。実験開始から30秒経過後に再び0.8m/

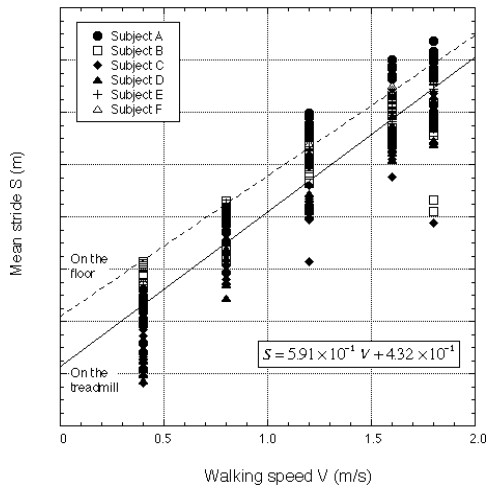


図13 ATLASでの歩行速度と歩幅の相関
Fig. 13 Speed versus mean stride on ATLAS

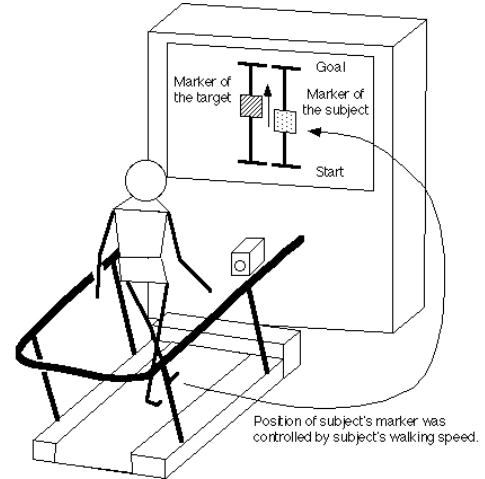


図16 追跡歩行タスク実験環境
Fig. 16 Experimental setup of "walk after the block"

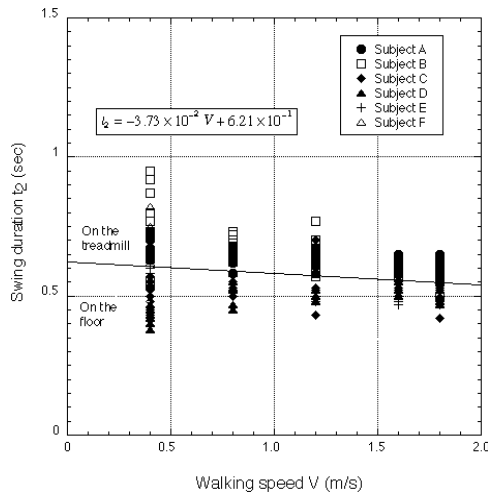


図14 ATLASでの歩行速度と遊脚時間の相関
Fig. 14 Speed versus swinging duration on ATLAS

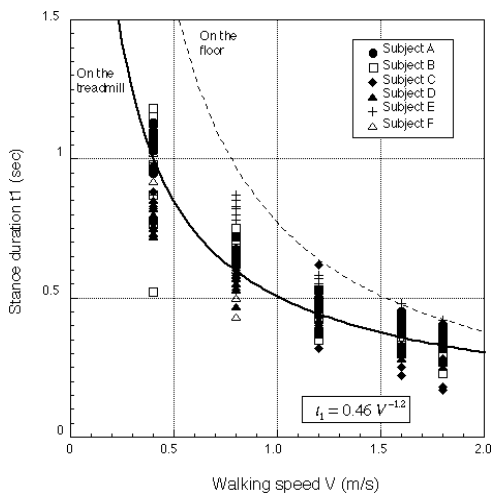


図15 ATLASでの歩行速度と立脚時間の相関
Fig. 15 Speed versus stance duration on ATLAS

secまで減速し、40秒経過した時点で停止する。被験者にはこの速度変化を数値ではなく、画面上のブロックの移動速度変化として提示する。被験者には、できるだけ同じ速度でこのブロックを追いかける様に指示した。

被験者は12名で、この内2名はATLASでの歩行に十分習熟していた。他の被験者はトレーニング用トレッドミルの使用経験はあったが、ATLASでの歩行経験はなかった。計測に先立って簡単にATLASでの歩行の方法を教示し、歩行開始、停止、加速動作が習熟できるまで自由に装置を体験させた。この段階で3名の被験者についてシステムが歩行動作中に歩行位置を目標に保持できずにベルト上で前後へ振動的に移動した。従って、残りの9名について、上記のタスクを10回実施し、推定歩行位置、推定歩行速度等のデータを計測した。以降の解析では10試行のタスクのうち前半5試行をタスクへの練習とみなし、後半の5試行についてデータとして用いた。

6.2 実験結果

このタスクでの典型的な追跡歩行動作を図17の時系列グラフに示す。図17-aは光学的に計測された被験者の足先の運動の様子とこれらの中点である推定された被験者位置を示す。これはトレッドミル上の座標系に基づく計測結果であり、図中右の矢付き線分が歩行方向とトレッドミルの歩行可能領域を示している。実験での歩行者保持目標位置は原点に設定しており、この結果から被験者の歩行位置は設定位置を中心に前後10cm程度の範囲内に保持されている事がわかる。

ベルトへの速度指令結果をフィードフォワード要素とPIフィードバック要素ごとに図17-bに示す。歩行位置がほぼ目標位置に保持されている結果から、ベルト速度がほぼ被験者の歩行速度と等しいとみなせ、対象ブロックの移動速度に合わせて歩行速度を変化できていることが分かる。また、ブロックが加速する21秒付近でベルト速度の応答にピークが見られる。過渡応答を考えるとこの時には被験者の加速によって発生する位置誤差にフィ-

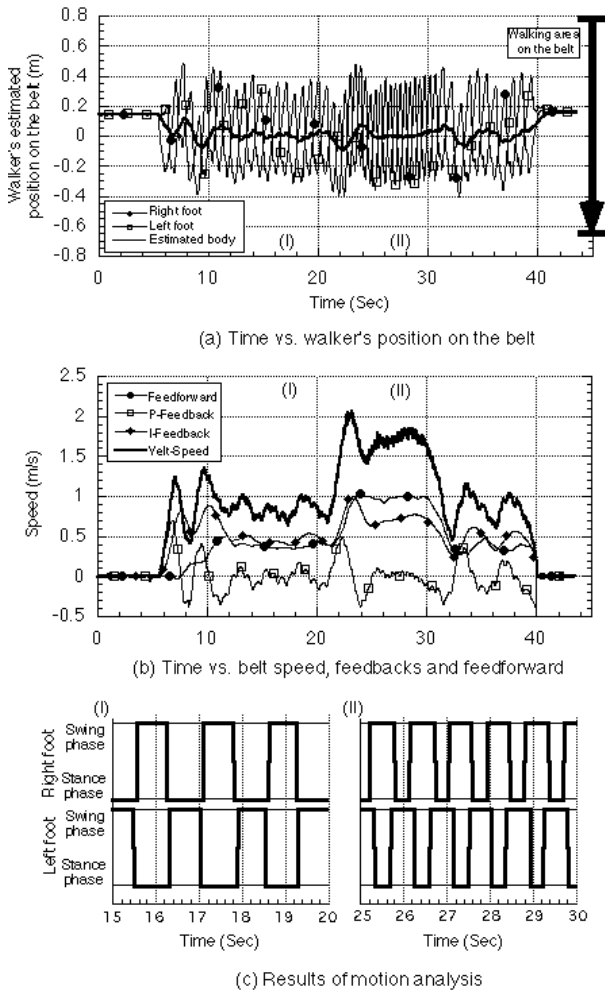


図17 追跡歩行タスクにおける典型的実験結果
Fig. 17 Typical results of walking on the ATLAS

ドバックがまず反応し、直ちにベルト速度を加速した。やや遅れて速度推定値が更新された時点でベルトの速度制御の主要素がフィードフォワードに切り替わっている。この過渡応答は1秒程度で収束し、前述の様に被験者位置も10cm程度の変動で抑えられていることから、我々の設計が有効に機能していると実証された。

また、図17-cは足先位置の運動情報に基づく動作解析部の両足の遊・立脚判定結果を示す。それぞれ、図17-a,bのグレ部(I)(II)での判定結果であるが、歩行速度0.8m/secの状態に比べ、歩行速度1.6m/secでは立脚時間が大幅に減少している事がわかる。

次に、被験者が自分の歩行速度を制御可能である事を示すため、対象ブロックと被験者の歩行速度差に着目した。図18は被験者毎に後半5試行での速度差を二乗平均した結果を示す。被験者中、A,BはATLASの熟練者でありこの実験で最も理想的な結果と見なせる。検定の結果では、被験者C, D, E, F, G, Hの結果はA,Bの結果と有意差は見られず、ほぼ自身の歩行速度を自由に制御できたと見なせる。被験者Iについては、歩行位置はほぼ目標位置に保持できたが、速度の制御が十分には実行できなかった

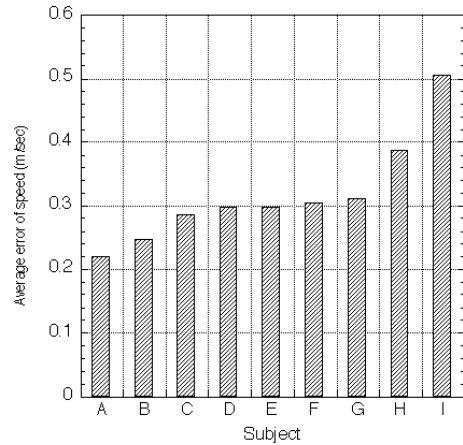


図18 追跡歩行タスクにおけるターゲットとの平均速度差
Fig. 18 Average error of speed

め大幅な誤差を示した。

練習フェーズで実験を中断した3名の被験者については、ベルト速度制御系の各制御要素のゲインを下げた所、全員が前述のような前後への振動的な動きを示さずに任意の速度で歩行できた。この結果から先の振動現象が歩行者位置保持制御が装置だけでなく、被験者まで含んだ系で考えた際に不安定であった結果と考察される。もちろん、この操作により位置保持の応答性が低下するが、制御ゲインを許容範囲内で個人毎に調整する手法が確立できれば解決できると期待される。

7. 結論と今後の計画

本報告では、双方向コミュニケーションのための自然な歩行による移動感覚を生成するためにLIに関する議論を行なった。まず、歩行者の動作を全く阻害しない光学的非接触手段による歩行動作計測手法を検討し、アクティブ型のトレッドミルを用いたLIである試作機ATLASへの実装を行なった。試作機による追従実験結果では、歩行者がATLAS上で任意に歩行速度を変更した際でもシステムが10cm程度のオバースhootで目標位置へ歩行者を保持できることを示した。

現状での問題点として、提案手法での歩行動作解析手法には歩行動作の個人差の適応が不十分である点が上げられる。特に、歩行の開始、停止といった過渡動作においては個人差が顕著に発生する。また、3章での被験者は30代の成人のみ対象としたが、Grieveらの報告[23]によると幼年から成人、高齢者となるにつれて、ここで採用した歩行速度と各パラメータの関係は変化している。従って、現在の速度推定アルゴリズムに何らかの個人差への適応手法が必要である。

また、トレッドミルタイプのもう一つの課題として、歩行進路を方向する動作への対応手法が挙げられる。本質的には2次元ベルトを実現すれば解決すると考えられるが、一般に機構が複雑になり、結果的にベルトの速度応答が低下するため低速での歩行しか対応できなくなる恐れがある。我々の提案では、足先動作の計測結果を元にベル

ト面全体を回転させ、回転動作の補償と擬似的な遠心力を生成する事を検討している。

冒頭で述べたように、我々の提唱するTel-E-Mergeによるコミュニケーション環境では、日常のコミュニケーションを対象として特に対話者の存在感を再現することを念頭に置き、その一形態として“歩行しながらのコミュニケーション”に着目した。ここで想定されるコミュニケーションは、Tele-Inviterのいる場所に深く関連して発生するコミュニケーションを対象としている。例えば、美術館や旅行先で美しい景色に出会い、感動した際には誰かにそれを伝えたいであろう。その際に、単に写真のような後日の感動の報告ではなく、その場にパトナが仮想的に存在する事によってその感動を共有できれば、双方の仮想的な体験がより深まると期待される。あるいは、歩行しながら日常の雑談を行なう際には、環境の変化に対する歩行のリズムが副次的に会話の流れを進めたり替えたりする契機となっていることから、仮想的な歩行環境によって会話自体を支援することも期待される。

これまでの段階ではまずTele-Visitorのためのデバイスを実現した段階である。現在は本研究の要ともいえるTele-Inviterの存在する環境でTele-Visitorの存在を示す装置の検討を進めている。この装置にはTele-Visitorに対して周辺環境の情報を送信すると機能と同時に、Tele-Visitorの存在を提示する機能が必要となる。具体的にはATLASを使用しているTele-Visitorの動作に連動する移動ロボットを実現し、Tele-Visitorの歩行動作に伴う情報を提示する機能を実装することを計画している。

参考文献

- [1] 宮里, "テレマ - ジシステムに関する基礎的検討", 信学技報 MVE97-82, pp. 11-16, 1997.
- [2] H. Iwata and T. Fujii, "Virtual Preambulator: A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environment," proc. of IEEE VRAIS'96, pp. 60-65, 1996.
- [3] F. P. Brooks Jr., "Walk Through-a Dynamic Graphics System for Simulating Virtual Buildings.," proc. of 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics, pp. 9-21, 1986.
- [4] M. Hirose and K. Yokoyama, "Synthesis and transmission of realistic sensation using virtual reality technology.," Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, vol.33, no.7, pp. 716-722, 1997.
- [5] J. M. Hollerbach, "Locomotion Interfaces", <http://www.cs.utah.edu/~jmh/Locomotion.html>.
- [6] R.P. Darken, W.R. Cockayne, D. Carmein, "The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds", Proc. of UIST'97, pp. 213-221, 1997.
- [7] 岩田, 吉田, "無限平面を用いた仮想歩行装置", 日本VR学会第2回大会論文集, pp. 254-257, 1997.
- [8] J.Eyre, <http://www.ndirect.co.uk/~vr-systems/sphere1.html>
<http://www.bbc.co.uk/tw/9798/9804sphere.shtml>
- [9] R. Latham, "Device for Three Dimensional Walking in Virtual Space", <http://www.cgsd.com/OmniTrek.html>.
- [10] G. P. Roston, T. Peurach, "A Whole Body Kinesthetic Display Device for Virtual Reality Applications", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3006-3011, 1997.
- [11] J. R. Ensor and G. U. Carraro, "Pelton: A VRML-Based Bicycling Simulator," SIGGRAPH'97 Visual Proc., pp. 198, 1997.
- [12] D. C. Brogan, R. A. Metoyer, and J. K. Hodgins, "Dynamically Simulated Characters in Virtual Environments," SIGGRAPH'97 Visual Proc., pp. 216, 1997.
- [13] I. Choi and C. Ricci, "Foot-Mounted Gesture Detection and its Application in a Virtual Reality Environment," proc. of IEEE Int'l conf. on System, Man and Cybernetics, pp. 4248-4253, vol.5, 1997.
- [14] R. Kadobayashi, K. Nishimoto, and K. Mase, "Design and Evaluation of Gesture Interface for an Immersive Virtual Walk-through Application for Exploring Cyberspace," proc. of Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG98), pp.534 -539, 1998.
- [15] M. Kobayashi, S. Shiwa, A. Kitagawa and T. Ichikawa, "Tilting Disc: A Real Scale Interface for Cyberspace", proc. of SID 98, pp.333-336, 1998.
- [16] K. Aminian, P. Robert, E. Jequier, Y. Schutz, "Estimation of Speed and Incline of Walking Using Neural Network", Trans. of Instrumentation and Measurement, vol. 44, No. 3, 1995.
- [17] 大和, 数藤, 伴野, 新井, "大面積圧力センサーと画像情報を用いた歩容解析", 信学技報, RU95-92, pp. 79-84, 1995.
- [18] 広川, 松村, "距離・時間因子計測用歩行路の改良開発", バイオメカニクス, vol. 8, pp.131-140, 1986.
- [19] D. A. Farris, G. C. Urquizo, D. K. Beattie, T. O. Woods, and D. G. Berghaus, "A Simplified Accelerometer System for Analysis of Human Gait," Experimental Techniques, vol. 17, pp. 33-36, 1993.
- [20] R. W. Soutas-Little, J. C. Otten, and A. J. Hull, "Use of Computer Aided Design and Analysis in Gait and Athletic Footwear Evaluation," ASME AMD, vol. 84, pp. 349-352, 1987.
- [21] T. Yokoi, A. Takahashi, and K. O. Byun, "Self-Organization of Lower Limb Motion in Human Locomotion," Robotics and Mechatronics, vol. 8, pp. 364-371, 1996.
- [22] 徳田, 丸山, 中山, "屋外歩行とTreadmill歩行における老年者の歩行特性", 人間工学, Vol.20, No.3, pp. 161-169, 1984.
- [23] D.W. Grieve, R.J. Gear, "The Relationship Between Length of Stride, Step Frequency, Time of Swing and Speed of Walking for Children and Adults", ERGONOMICS, vol. 5, No. 9, pp. 379-399, 1966.
- [24] 木村, 神谷, "速度変化に伴い人の歩行がどう変わるか", バイオメカニクス, Vol.8, pp.69-79, 1982.
- [25] N. Talbert, "Toward Human-Centered System," IEEE Computer Graphics and Applications July/August, pp. 21-28, 1997.

(受付1998年11月2日)