

Title	仮想都市環境における人間と仮想空間のインタラクションインタフェースの構築
Author(s)	酒井, 潤
Citation	
Issue Date	2004-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1778
Rights	
Description	Supervisor:堀口 進, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

仮想都市環境における人間と仮想空間の インタラクションインタフェースの構築

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

酒井潤

2004 年 3 月

修 士 論 文

仮想都市環境における人間と仮想空間の インタラクションインタフェースの構築

指導教官 堀口 進 教授

審査委員主査 堀口 進 教授

審査委員 Shen Hong 教授

審査委員 松澤 照男 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

210039 酒井潤

提出年月: 2004 年 2 月

概 要

近年、コンピュータは格段に高性能になり、仮想現実（バーチャルリアリティ）の技術が進歩してきている。バーチャルリアリティ技術とは、コンピュータ内に電子的な物体等を構築することにより、人間が実世界で体験するのと同様な体験を可能にする技術である。例えば、都市や住宅を設計する場合、等身大の仮想都市を構築して、あらかじめ安全性や快適性の評価を行うことができる。この都市環境の仮想体験をより現実感のあるものとするためには、実際の都市と同じ等身大での体験ができることが望ましい。仮想環境に没入できるような視覚情報を提示するだけでなく、ユーザとコンピュータ間のインタラクションインタフェースも違和感のないものにすることが必要である。

従来の仮想3次元空間内を移動するためのインタフェースとしてはさまざまなものが提案されている。より移動感覚を自然に提示するためのものとして手の振りをインタフェースとする研究が行われている。しかし、移動のために手を用いると、それ以外の他の目的に手を使うことができないという欠点がある。また、体重移動による仮想空間内移動インタフェースを提案した研究も行われているが、人間が自然に行っている動作ではないので直感性に欠ける。特に都市設計のための仮想都市環境システムでは、評価の都市内を移動する必要があり、安全性や快適性に問題があれば、設計物や置物の配置を変える必要がある。このような仮想都市環境システムでは、少なくとも仮想環境内を移動し、仮想物体をつかみ別の場所へ移動することが必要となる。しかし、従来研究のインタフェースでは、不十分である。

本研究では、人間が実世界で行う動作と同様な動作によりインタラクションが可能なインタフェースを設計構築する。具体的には、人間の歩行動作により仮想都市内を自由に移動し、人間の手により仮想物体を操作するインタフェースを提案する。そして、モーションキャプチャを用いて歩行ならびに仮想物体操作インタフェースを実装し、評価実験によりこれらの仮想都市環境におけるインタラクションインタフェースの有効性について詳しく検証する。さらに、仮想都市空間に自分や他人の分身であるアバタを導入し、アバタとのコラボレーションを実装してその有効性についても議論する。

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第2章	仮想現実技術と仮想都市環境	3
2.1	はじめに	3
2.2	仮想現実技術	3
2.3	仮想都市環境	4
2.4	インタラクションインタフェース	4
2.5	まとめ	7
第3章	仮想都市環境における移動インタフェース	8
3.1	はじめに	8
3.2	実際の歩行動作の計測	9
3.2.1	計測方法	9
3.2.2	歩行動作の分析	11
3.3	歩行速度の推定	13
3.4	一步目の予測	14
3.5	拡張歩行	15
3.6	仮想都市映像の拡大縮小による拡張歩行	16
3.7	身体方向を利用した仮想空間内移動方向制御	16
3.8	まとめ	18
第4章	仮想都市環境における仮想物体操作インタフェース	22
4.1	はじめに	22
4.2	仮想物体操作の過程	22
4.3	まとめ	24
第5章	仮想都市環境インタラクションシステム構成	26
5.1	はじめに	26
5.2	入出力装置	26

5.2.1	Flock of birds	26
5.2.2	CAVE	27
5.2.3	シャッターメガネ	29
5.2.4	立体視対応・超高精細 CRT プロジェクタ	29
5.2.5	Onyx3200	30
5.3	システム構成	31
5.3.1	Motion Star を使用したシステム構成	32
5.3.2	Flock of Birds を使用したシステム構成	33
5.3.3	CAVE への仮想都市の表示	34
5.3.4	仮想都市の表示のためのシステム内のプロセス	34
5.3.5	背後の仮想空間への移動と後ろ歩きをする場合	34
5.3.6	坂での移動と速度変化	35
5.3.7	CAVE のスクリーンへの接触問題	35
5.4	移動インタフェースの速度制御と方向制御の評価実験	35
5.4.1	足踏み歩行による目的地までの速度制御	35
5.4.2	ターゲット追跡のための足踏み歩行による速度制御	36
5.4.3	足踏み歩行による目的地までの方向制御	36
5.4.4	足踏み歩行による経路上の方向制御	37
5.5	3DWAND との比較	37
5.5.1	3DWAND との比較実験	37
5.5.2	3DWAND の操作方法	38
5.5.3	3DWAND との比較実験結果	38
5.6	まとめ	39
第 6 章	仮想都市空間におけるアバタ構築とコラボレーション	54
6.1	はじめに	54
6.2	アバタのある仮想都市空間システム構成	55
6.3	アバタ作成のための人体構造の定義	55
6.4	仮想空間における人体モーションの合成	56
6.5	仮想都市空間でのアバタとのコラボレーション	58
6.6	考察	58
6.7	まとめ	59
第 7 章	まとめ	64
7.1	まとめ	64

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

近年、コンピュータは格段に高性能になり、仮想現実（バーチャルリアリティ）の技術が進歩してきている。仮想現実とは、人間の外界認識を司る視覚、聴覚、触覚等の器官に対して、コンピュータによる合成情報を提示し、それによって人間周囲に仮想的な世界を作り上げるための技術である。このバーチャルリアリティの技術を用いることにより、人間が実世界で体験するのと同じように仮想の世界で体験することが可能になる。例えば、都市や住宅などを設計する場合、等身大の仮想デジタルシティを構築することで、あらかじめ安全性や快適性の評価を行うことができる。このような仮想環境では、実世界で人間が見たり動作したりすることと同じような体験ができることが要求されており、このような仮想環境では、実世界の人間の動作と同じようにインタラクションすることが要求されており、少なくとも仮想環境内を移動し、仮想物体をつかみ別の場所へ移動するということが絶対不可欠になる。

従来の仮想3次元空間内を移動するためのインタフェースとしてはさまざまなものが提案されている。久木元[1]は、より移動感覚を自然に提示するために手の振りをインタフェースとした手法を提案した。しかし、移動のために手を用いると、それ以外の他の目的に手を使うことができないという欠点がある。また、志和[2]らは、体重移動による仮想空間内移動インタフェースを提案したが、人間の自然の動作またはそれに近い動作でないで直感性に欠ける。特に仮想都市環境において、自然な動作でインタラクションするインタフェースとしては、不十分である。

仮想環境と自然にインタラクションするには、実世界の人間の動作を仮想世界に反映させる必要がある。そこで本研究では、人体各部位に特徴点を設置し、その各点の3次元座標を使って仮想都市内を自由に移動し、仮想物体を操作する手法を提案する。

そのために、モーションキャプチャを用いることによって、人間動作の3次元データを正確に取得し、人体の動きに応じて仮想空間と直感的にインタラクションする新しいインタフェースについて述べる。実際に仮想空間内を自由に移動するには、速度制御法と方向制御法が必要になる。そこで、モーションキャプチャによって得られる3次元位置データから、移動の際の速度制御および方向制御を提案する。仮想都市空間内の移動インタフェースには、人間の歩行動作に近い足踏み歩行を用いる。その場での足踏み動作をインタフェースに用いる利点としては、人間の移動手段としての歩行動作に近く、実際に移動するための仮想環境と同じ広さの空間が必要でないことである。さらに、仮想都市環境で

あるという特徴を生かして、高速に移動する場合、歩幅を大きくすることで歩行速度を速くする機能も付加した。他の都市へ移動する長距離移動の場合は、仮想都市の縮尺を変えることで容易に移動する方式も導入する。本研究では、移動操作を足に担わせることにより手で他の操作が可能になるため、作業の基礎動作となるオブジェクトをつかみ移動する機能も実装する。仮想物体の操作法も、人間が実世界で行う動作に近い方が望ましい。本研究では、握るという動作により物体を選択する仮想物体移動法を提案する。ユーザの手首と手先にそれぞれ1つ座標を設置したモデルを考え、ベクトルの大きさを計算する。そのベクトルの大きさがある閾値を越えた場合に握ったと判定する。仮想物体と手の接触判定は、仮想オブジェクトを直方体の領域で取り囲み、この直方体の中に、腕先に設置した座標が入ることで接触していると判定する手法を採用した。そして、提案手法を用いた仮想都市インタラクションシステムを構築し、仮想都市内へ自分や他の分身であるアバタを導入することで、仮想都市内のアバタとコラボレーションを実現する。

1.2 本論文の構成

以降、第2章では、仮想都市で実現するためのインタラクション機能を明らかにする。また、従来研究のインタフェースを説明し、仮想都市内を自然な動作でインタラクションをするのに不十分であることを明らかにする。第3章では、実際の歩行動作の計測結果から、足踏み動作による仮想空間内の歩行速度制御と移動方向制御の手法について議論する。さらに、仮想都市環境であるという特徴を生かした高速な空間移動方式についても概説する。第4章では、人が実世界で行う動作のように、仮想物体を操作する手法を提案する。第5章では、提案した手法を用いた仮想都市インタラクションシステムについて述べる。次に、実現した仮想都市環境システムの中で、従来研究であげた3DWANDと提案したインタフェースとの比較実験を行い、本インタフェースの有効性を示す。第6章では、都市生活者の視点から都市を評価するための仕組みを提案する観点から、仮想都市空間へ自分や他の分身であるアバタの導入方法について述べる。第7章では、本論文をまとめ、結論とする。

第2章 仮想現実技術と仮想都市環境

2.1 はじめに

都市環境の仮想体験をより現実感のあるものとするためには、実際の都市と同じ等身大での体験ができることが望ましい。臨場感のある等身大の仮想都市環境により、その都市を仮想体験することで、都市の問題点を体感することができ、都市の評価、設計に役立つと期待されている。

このような仮想都市空間では、なるべく実空間と同じ条件下で行うのが望ましいが視覚情報のみに頼るリアリティには限界がある。高い没入感を提示するという事は実空間で感じる感覚と違和感を少なくする必要がある。そのためには提示情報がよりリアリティを増しているように、ユーザとコンピュータへのインタラクションインタフェースも違和感のないインタラクションインタフェースにする必要がある。実世界と差異のないインタラクションインタフェースとは人間が実世界で行う動作と同じような人の身ぶりであると考ええる。

本章では、仮想都市で実現するためのインタラクション機能を明らかにする。また、従来研究のインタフェースを説明し、仮想都市内を自然な動作でインタラクションをするのに不十分であることを明らかにする。続く 2.1 では、仮想現実技術について説明する。2.2 では、仮想都市環境の重要性を述べる。2.3 では、仮想世界とのインタラクションのための従来のインタフェースについて概説する。2.3 では、まとめを述べる。

2.2 仮想現実技術

近年コンピュータは格段に高性能になり仮想現実技術においてリアリティを高めるために高品質のグラフィックスを使用している。グラフィックスの精度が向上すればユーザの仮想空間への没入感はさらに高くなる。しかし、視覚的に臨場感が増せば VR 酔い (Simulator Sickness) など望ましくない影響もユーザに与えることになる。このような環境は視覚情報と体性感覚の整合性がとれていないためと考えられる [3]。特に仮想空間内でシュミレーションやトレーニングといった作業を行う際に、なるべく実空間と同じ条件下で行うのが望ましいが視覚情報のみに頼るリアリティには限界がある。高い没入感を提示するという事は実空間で感じる感覚と違和感を少なくする必要がある。そのためには提示情報がよりリアリティを増しているように、ユーザとコンピュータへのインタラクションインタフェースも違和感のないインタラクションインタフェースにする必要がある。実世界と差

異のないインタラクションインタフェースとは人間が実世界で行う動作と同じような人の身ぶりであると考える。

2.3 仮想都市環境

都市設計において重要な点は、その都市に住む人間のために安全に快適な環境を実現することである。しかし、都市の完成後に問題点が発生した場合、都市を作り変えることは、困難なことである。そのため、設計時にあらかじめ安全性や快適性の評価を行う必要がある。

従来、このような評価は、異なる専門分野を持つ複数の専門家達の間で検討されてきた。しかし、その都市で実際に生活する一般市民と専門家との間での認識の違いから、必ずしも正確な評価とならない場合もあり、後から予想外の問題点が発生することもある。そのために、設計時には専門家の意見だけでなく、一般市民の意見も取り入れることが望まれる。このとき、設計における専門的な事柄が、一般市民に理解されにくいこともあるため、専門知識を必要としない、誰でも簡単に評価に参加することができるような方法が必要となる。

この方法の一つとして、仮想現実技術（バーチャルリアリティ）の技術を利用する方法がある。都市環境の仮想体験をより現実感のあるものとするためには、実際の都市と同じ等身大での体験ができることが望ましい。臨場感のある等身大の仮想都市環境により、その都市を仮想体験することで、都市の問題点を体感することができ、都市の評価、設計に役立つと期待されている。

2.4 インタラクションインタフェース

仮想都市環境を体験するには、仮想空間を自由に移動し、仮想物体を操作する必要がある。ここでは、従来のインタフェースの機能、特徴を整理する。

仮想3次元空間内とインタラクションインタフェースとしては様々なものが提案、実現されている。マウスやジョイスティックのように手で操作するインタフェースが圧倒的に広く普及している。身体の他の部位を使って操作するインタフェースの研究例もいくつか報告されている。また、体感ゲーム機分野ではそれぞれのゲームに合わせていろいろなインタフェースが開発されている。

- マウス

マウスは最も標準的なインタフェースデバイスである。システムによる差があるものの、マウスカーソルで画面上部を押すと前進、下部を押すと後退、右または左を押すと押した方向に進行方向を変更するというようなインタフェースが一般的である。画面の上下に方向を割り当てるのではなく、ボタンを押し下げて上方に移動すると前進というように

ボタンを押し下げた位置からの変位によってコントロールする方法も一般的である。このようなマウス単独によるインタフェースのほかに、グラフィカルユーザインタフェースとの組み合わせによって移動を指示するインタフェースも一般的である。例えば、画面上に表示されたハンドルを操作することで移動を指示するインタフェースなどがある。

- ジョイスティック

ジョイスティックでは、前に倒すと前進し横に倒すと倒した方向に転回するというように、行きたい方向にスティックを倒すことによって移動する方向をコントロールする。力をかけなければ、スティックはもとの位置に復帰し、移動は停止する。行きたい方向にスティックを倒すという操作は直感的で、理解しやすいインタフェースと言える。3次元マウスと呼ばれるデバイスもこれに似ている。軸で固定された球状のつまみを前後、左右、上下に押すことで対応する方向に移動することができる。またつまみをねじることで向きを変えることができる。かけた力を解くと、もとの位置、向きに復帰し移動は止まる。

- 3D-Wand

3D-Wand は手に持つことができる小型の棒状のデバイスで、位置と方向を検出するセンサと数個のボタンを備えている。3次元空間中の位置や方向を指しながらボタンによる指示ができるので、例えば仮想空間中の物体をつかんで移動したりすることができる [4]。このデバイスを用いて仮想空間内を移動するインタフェースでは、例えば、右に進むには棒を右に向けてボタンを押す、右に転回するには右ボタンを押すというような操作を行う。また、ハンドジェスチャを入力、認識し、歩いたり走ったりという指示を出すインタフェースも開発されている [6]。

手を用いるインタフェースは理解しやすく、また疲労が少ないという点で、扱いやすいインタフェースであるといえる。しかし、仮想環境内では移動だけではなく、いろいろな操作を行う場面も考えられる。その操作の多くは手を用いることが想定される。したがって、手を移動のために用いるのは好ましくない。また、仮想環境の中で自分が移動しているように感じる没入感があまり得られない。

- 歩くインタフェース

我々は人間は通常、移動に足を用いている。すなわち、歩く、走るということが移動の基本になっている。仮想環境においても、歩くことによって移動を行うのが自然であると考えられる。歩行インタフェースを実現する方法としては、実世界での歩行を検出することが考えられる。しかし、実際に歩きまわる人間の動作をすべて取得するためには、動く範囲すべてをカバーするセンサが必要となる。また、対象となる仮想環境と同じ広さの空間が必要になる。この問題を解決するために、その場での歩行動作を可能とする方法が種々提案されている。

岩田らは、ローラースケートや滑るサンダルを用いた歩くインタフェースを実現している [7][8]。これらのインタフェースでは、ユーザは磁気位置センサと床面との接触を検

出するセンサを取り付けた「滑るサンダル」を履いて輪の形のセーフティフレームに入る。その中で移動する方向に歩くが、実際にはセーフティフレームに移動を制限されるので足が滑るだけで移動することはない。センサが歩く動作を検出し仮想空間内の移動に反映させるので、ユーザは歩く動作をすることで仮想空間内を歩くことができる。

また、岩田らはトレッドミルを用いた方法も提案している。トレッドミルは、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からできるパッシブ型である。トレッドミルの問題点に、歩行方向がベルト方向に限定される点が挙げられる。

歩行インタフェースは、足によるインタフェースの自然な形である。現実空間での歩行を仮想空間での歩行に直接的に結び付ける歩行インタフェースでは、日常歩くのと同じように仮想空間内を歩くことができ、説明しなくてもその使い方を理解することができる。

これらのシステムでは、その装置上に行動範囲が限られること、装置が大掛かりになることが問題である。多面スクリーン式の没入型ディスプレイと併用する場合、足下への映像提示の障害となる。パワーの大きな機器的制御が必要となる。例えば、走行時に静止する場合などベルトを踏ん張って止めなければならない。

● 傾けるインタフェース

身体を傾けることによるインタフェースがFairchildらによって提案されている[12]。これは、頭部に取り付けた磁気位置センサによって計測した頭と状態の位置と傾きの変位量を用いたもので、2種類の方法を提案している。一つは頭の位置の変位量を指数関数的に増幅して仮想空間内の変位量に割り当てたもので、わずかに頭を傾げるだけで遠くへ移動でき、もとの位置に頭を戻せば原点に戻ってくる。もう一つは、変位量を移動速度に割り当てたもので、身体を傾げることでその方向に進むことができる。傾ける量が多いほど早く移動し、頭をもとの位置に戻せば止まる。

問題として、頭部を動かして何かあたりを見る場合、頭部が示す方向を検知してナビゲーションコマンドと誤って解釈し、誤ったナビゲーションをしてしまう場合がある。

小林らは、体重の移動を検出して移動の方向や速度を入力する方法を提案している[2]。Josephらは、体を傾げることにより移動の方向や速度を入力する方法を提案している[17]。

傾けるインタフェースの問題として、移動方向が制限される。また、歩行動作ではないので直感的ではないといった問題点が考えられる。

● ゲーム機等のインタフェース

体感型ゲームやスポーツトレーナーのインタフェースにも手以外の部位を主に用いるものがある。例えばオートバイの車体を傾けるインタフェースや、スキーのインタフェース[13]等である。これらのインタフェースは、多くの場合、決められたコースを走る中で、種目特有の身体の動きを入力し、反力としてリアルな力触覚フィードバックを返すことを目的に設計されている。

- 音声のインタフェース

Philip らにより、音声を入力、認識し、指示を出すインタフェースも開発されている [15]。しかし、音声認識が利用できない不適切である、または望ましくない状況に対しては有効ではない。

2.5 まとめ

仮想都市内では、実世界の人間の動作と同じようにインタラクションすることが要求されており、少なくとも仮想都市内を自由に移動し、仮想物体を操作する必要があることを示した。特に都市設計のための仮想都市環境システムでは、都市内を体験するために移動する必要があり、安全性や快適性に問題があれば、設計物や置物の配置を変える必要がある。このような仮想都市環境システムでは、少なくとも仮想環境内を移動し、仮想物体をつかみ別の場所へ移動することが必要となる。ここでは、従来研究のインタフェースを説明し、これらの用途として不十分であることを明らかにした。

続く 3 章では、本論文での仮想都市内移動方法について述べる。4 章では、仮想物体操作について述べる。

第3章 仮想都市環境における移動インタフェース

3.1 はじめに

我々人間は、いろいろな歩行速度で歩くことができる。平均的な歩行速度は、男性で約 4.8km/h(80m/min), 女性で 4.5km/h(75m/min) 程度である。何かをしながら歩く場合にはより速く 100m/min 以上になることもある。さらに高速なものに競歩がある。世界記録では 200m/min 以上の速度になる。しかし、一般的に 120m/min 程度を越えるとエネルギー効率のよい走行運動に切り替えるため、120m/min を大きく越えるような高速の歩行をすることは日常生活ではほとんどない。

このように、人間は目的や場面によって歩行速度を変えている。歩行動作を取り入れた移動インタフェースにおいても、実際の歩行と同じような感覚で速度制御ができれば操作性が理解しやすく、扱いやすいインタフェースが実現できると考えられる。

我々人間は通常、移動に足を用い、歩く、走るということが移動の基本になっている。歩くことによって移動を行うのが自然であると考えられる。実際に歩きまわるためには、対象となる仮想環境と同じ広さの空間が必要になるが、実世界におけるユーザの動けるスペースには限りがある。そこで、本研究では、より人間の歩行動作に近い足踏み動作を適用する。その場での足踏み動作を移動インタフェースに用いる利点としては、

- 人間は、自然空間内では主に足で移動するため、足に仮想都市環境内の移動のための操作を担わせるのは直感的でわかりやすい。
- 実際の歩行動作のトラッキングのように広い場所を必要としない。
- 踏み外す等の危険もない。
- 足に移動を担わせるため、手で他の操作が可能になる。

という点が挙げられる。

仮想空間内を自由に移動するには、速度制御と方向制御が必要になる。ここでは、実際の歩行動作の計測結果から、足踏み動作による仮想空間内の歩行速度制御と移動方向制御の手法について議論する。3.2 で実際の歩行動作の計測について述べる。3.2 の結果に基づいて 3.3 で歩行速度の推定を述べる。3.4 では、足踏み歩行での一歩目の予測方法について説明する。3.5 では、長距離の移動のための拡張歩行方法を説明し、3.6 では、仮想都市映像の拡大縮小による拡張歩行方法について概説する。3.7 では、身体方向を利用した仮想空間内移動方向制御について説明する。3.8 では、まとめを述べる。

3.2 実際の歩行動作の計測

3.2.1 計測方法

人間は目的や場面によって歩行速度を変えている。足踏み歩行により、実際の歩行と同じような感覚で速度制御ができるように、人間が通常どのように歩行速度を変えているかを調べる。今回、実際の歩行動作の3次元位置情報を取得するために、磁気センサーである Motion Star を用いデータを取得した。取得したデータを分析するために、計算機 Onyx を用いて処理を行った。

図の 3.1 に Motion Star を示す。Motion Star はモーションキャプチャーシステムとして従来の Flock of Bird を基本に改良した製品である。

Motion Star は人体アニメーション、生体力学、CAD、フライトシュミレーション、医療用、テロロボティクス、動作研究、VR（仮想現実）その他、多様化したアプリケーションがある。レシーバー（小型受信器）を頭、胴、手、脚等に装着したり、その他の動作物体に取付けてそれぞれの運動を測定することが可能である。以下に Motion Star の詳細を示す。



図 3.1: Motion Star

- 自由度：6 自由度（位置、角度）
- 最大センサー数：18 センサー/人
- 計測可能 角度： $\pm 180^\circ$ （アジマス、ロール） $\pm 90^\circ$ （エレベーション）
- 計測範囲： ± 10 フィート（3 m）の半球内位

- 置精度：0.3 インチ (7.6 mm) RMS (1.5 m 範囲)0.6 インチ (15.2 mm) RMS (3 m 範囲)
- 角度精度：0.5 °RMS (1.5 m 範囲)1.0 °RMSs (3.0 m 範囲)
- 位置分解能：0.03 インチ (0.76 m)(1.5 m 範囲)0.10 インチ (2.54 m)(3.0 m 範囲)
- 角度分解能：0.1 °(1.5 m 範囲)0.2 °(1.5 m 範囲)
- アップデートレート：最大 100 データ/秒
- 出力：X、Y、Z
- インター フェイス：Ethernet,RS232C

今回の実験では人間の歩行動作について、かかとの高さ、膝の高さ、股下の角度、ピッチ、歩幅、歩数、歩幅、歩行速度について調べた。計測は、約 7m の直線歩行路を設定し、磁気センサーである Motion Star を用いて、歩行中の両足のかかとの位置をサンプリング周波数 88.6Hz で測定した。

図 3.2 に歩行動作計測環境を示す。