



ワイヤ駆動モーションベースを用いた月面跳躍体験

Moon Jumping Experience Using Wire Driven Motion Base

平井亜季子¹⁾, 岩田洋夫²⁾, 矢野博明²⁾

- 1) 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, a_hirai@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)
 2) 筑波大学 システム情報系 知能機能工学域 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要: 本研究ではワイヤ駆動モーションベースを用いた月面跳躍体験の実装と評価を行う。従来の月面体験装置に存在する, 自然な姿勢で体験できない, 可動域が狭い, 映像提示不可などの制限を解決するため, 広い可動域を有しユーザの身体動作を阻害しないワイヤ駆動モーションベースを用いた。ユーザの位置情報から跳躍のタイミングの計測と跳躍軌跡の予測を行い, モーションベースにより提示する事で月面での跳躍体験を実現した。

キーワード: ワイヤ, モーションベース, モーションキャプチャ, 月面跳躍

1. はじめに

1.1 研究背景

1969 年にアポロ 11 号が月面着陸を達成してから現在まで, 月面や地球近傍の惑星への有人探査が数多く計画されている。しかし, 宇宙へ飛び立つことは命の危険と隣り合わせであり, 膨大なコストが必要となる。そこで低重力下での人間の運動特性に関するシミュレータの開発と研究が数多くなされてきた。一方でバーチャルリアリティの技術を利用して月面体験を実現しようという試みがある。その中でもより臨場感の高い体験を実現するためにモーションベースと呼ばれる前庭感覚提示装置を用いることがある[1]。モーションベースはシミュレータやエンタテインメントの分野でも活躍している。

しかし, 一般的なモーションベースはユーザを座席に固定するため, 乗り物に乗った感覚しか提示できない。また, 可動域が狭く, 用途が限定的であり, ユーザが自分の意思で操作できるとは言いがたいものがほとんどである。そこで, 本研究室ではワイヤを用いた新たな形式のモーションベースの開発を行ってきた。本装置では大空間実験モジュールを利用することで広い並進可動域, ユーザを吊り下げるという形式をとることで身体動作の自由, モーションキャプチャシステムを併用することでユーザの意思を反映させた操作が可能となる。

本研究ではワイヤ駆動モーションベースを用いることで人間の跳躍力を 6 倍にする月面跳躍体験を提案する。人間の跳躍動作をモーションキャプチャによって取得, 跳躍距離を予測しモーションベースによって提示する手法の提案と装置の評価を行う。

Akiko HIRAI, Hiroo IWATA, and Hiroaki YANO

1.2 関連研究

月面歩行を実現するために現在まで様々な手法が取られてきた。NASA は月面作業訓練のため Lunar Landing Research Facility にて月面歩行シミュレータを利用して。これはユーザをワイヤで吊るし, 斜めの壁を歩くことで重力加速度の分力を 6 分の 1 にし, 疑似的な月面の再現を行っていた。また, ウィンチによって吊り下げることで重力の 6 分の 5 を免荷する装置[2]では, 一本のワイヤによって吊り下げるため, 可動域が狭く, ユーザが重心から移動すると牽引力が変わってしまう。バネやトレッドミルを組み合わせることで重力を免荷する装置も存在する[3]が, これらの装置は歩行に重点をおいているためやはり可動範囲が狭いものが多い。特に弾性体を利用するものは伸びに比例するため, ユーザが大きく移動すると力が変化してしまうなどの課題がある。

2. システム構成

本システムは大空間実験モジュール LargeSpace[4], ワイヤ駆動モーションベース, モーションキャプチャシステムによって構成される。図 1 に LargeSpace とワイヤ駆動モーションベースの鳥瞰図を示す。

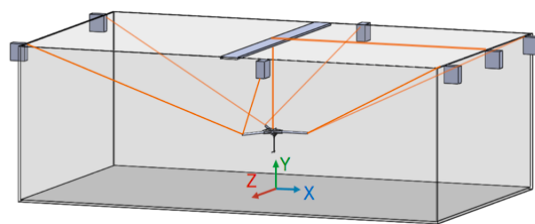


図 1 : LargeSpace 鳥瞰図

2.1 LargeSpace

大空間実験モジュール LargeSpace は幅 25m, 高さ 7.7m, 奥行き 15m の広さを有する。壁面 360 度と床面をスクリーンとし, 12 台のプロジェクトによって立体視映像を投影する大規模没入ディスプレイである。LargeSpace の座標系は長辺を X 軸, 高さを Y 軸, 短辺を Z 軸とする。

2.2 ワイヤ駆動モーションベース

ワイヤ駆動モーションベースは姿勢制御用の 6 本のワイヤとベースを真上に引き上げるための 1 本のワイヤの計 7 本のワイヤ長を制御することで実現される。各ワイヤの配置は図 1 に赤い線で示している。各ワイヤの長さの算出にはスチュワートプラットフォーム機構の計算式を参考にした。7 本のワイヤの先にはユーザが搭乗するためのベースが接続されている。ベースは正三角形をしており, 各頂点に 2 本ずつと中央に 1 本のワイヤが取り付けられている。ユーザは高所作業用ハーネスを身につけ, このベースからロープで吊り下げる形で搭乗する。図 2 に搭乗中の様子を示す。

2.3 モーションキャプチャ

本システムではモーションキャプチャシステムとして OptiTrack 社の Prime41 カメラを利用した。計 21 台のカメラを LargeSpace 上方に設置した。フレームレートは 120fps であり, 誤差 1mm 以下の精度で検出する能力を持つ。図 3 に示す再帰性反射素材マーカ付きメガネをユーザに装着してもらい, ユーザの頭の位置として検出する。このメガネは LargeSpace での映像提示に使われるアクティブシャッター方式のメガネであり, 映像提示とユーザの位置取得を同時に行うことができる。

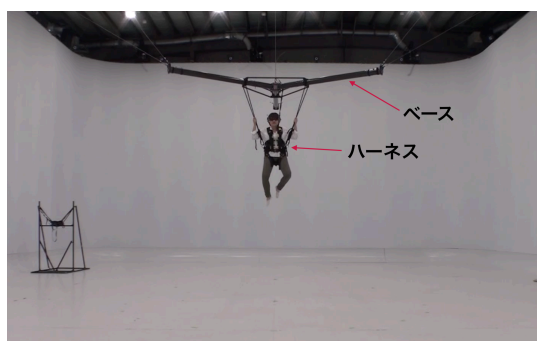


図 2 : 跳躍中の様子



図 3 : マーカ付きメガネ

3. 月面跳躍システム

本システムではユーザの跳躍を検出, 跳躍高さや跳躍距離を予測し, 重力を 6 分の 1 とした時の跳躍をモーションベースによって提示することを目的とする。まず, Y 軸方向 (跳躍高さ) に関して実装した後, X 軸方向 (跳躍距離) の実装を行う。以下に各軸の提案手法を述べる。

また, モーションキャプチャカメラが全て頭上にあるため頭上以外ではキャプチャが安定しないという理由から, 本研究ではメガネのみを用いた予測を行う。

3.1 Y 軸方向

通常跳躍中は外力を加えられないため, 初速度依存の斜方投射の放物線を描く。そのため Y 軸方向に関しては跳躍の初速度を検出することで跳躍軌跡を算出できる。以下に放物線式を記す。y は跳躍高さ, v_0 は鉛直方向の初速度を表す。

$$y = v_0 t - \frac{1}{2} g' t^2 = v_0 t - \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{6} t^2$$

図 4 に地球上での跳躍時の頭の位置と変化量の典型例を示す。図 4 より, 足が地面を離れると同時に速度最高点に到達することがわかる。従って, 速度最高点を鉛直方向の初速度とみなすことができる。また, モーションキャプチャとモーションベースとの通信に 0.3 秒程度の遅れが存在するため, 初速度を検出後にモーションベースを動作させるとユーザの動きに間に合わないという問題が発生する。そこで, ユーザの沈み込みの最下点を通過したタイミングから一定速度でモーションベースの上昇を始め, 初速度を検出次第, 放物線軌道へ移行するシステムを実装した。また, 跳躍以外の動作の誤検出を防ぐため, 変化量の閾値を 0.012[m]以上と設定した。

3.2 X 軸方向

図 5 に地球上で前方へ跳躍時の X 軸方向の頭の位置と変化量の典型例を示す。通常, 斜方投射では X 軸方向へ等速度で移動するが, 図 5 より頭の速度は一定にならないことがわかる。頭の動きが単純な式で表せないため, 本研究では複数人に跳躍してもらいその結果から跳躍距離を予測した。

跳躍データの取得は男女 7 名で行い, 目標飛距離を 0cm, 25cm, 50cm, 75cm, 100cm と変化させ, 各 20 回, 計 100 回を飛んでもらった。跳躍時には両足を揃えて飛ぶこと, 進

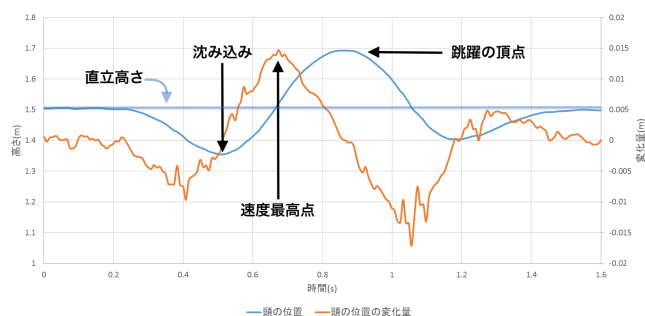


図 4 : 地球上での Y 軸方向の頭の位置と変化量の典型例

行方向を向くことを条件とした。取得したデータより、「沈み込みを検知するまでに X 軸方向へ進んだ移動量」と「X 軸方向の跳躍距離」の相関係数は 0.81 であり強い相関があることが分かった。図 6 に 7 名分の沈み込み検知までの移動量と跳躍距離の関係を示す。また、散布図から最小二乗法を用いて算出された近似直線を以下に示す。X は跳躍距離、x は沈み込みを検知するまでの X 軸方向の移動量を表す。

$$X = 2.8826x - 0.0668$$

表 1 より各ユーザの実測値と近似式の決定係数が 0.5 を上回る者が 7 人中 5 人いたため、本実験ではこの近似式を用いて計測を行った。ユーザの跳躍動作開始から沈み込みを検知するまでの X 軸方向の移動量を取得し、この近似直線から跳躍飛距離を予測、さらに 6 倍にした距離をベースによって提示した。また、Y 軸方向の移動と同時に等速度で X 軸方向へ移動するよう調整した。

4. システム評価

本論文では、システムが適切にユーザの跳躍動作を検出、予測し装置によって提示できるかに重点をおき、評価した。まず、Y 軸方向への実装を行い、さらに X 軸方向を追加し、評価を行った。

表 1：ユーザの実測値と近似式の決定係数

No	1	2	3	4	5	6	7
R^2	0.92	0.64	0.66	0.92	0.52	0.34	0.40

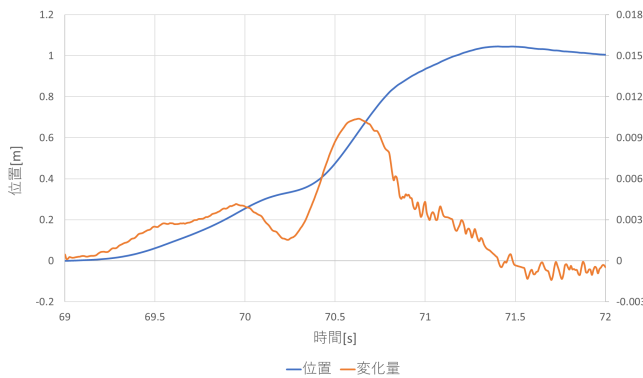


図 5：地球上での X 軸方向の頭の位置と変化量の典型例

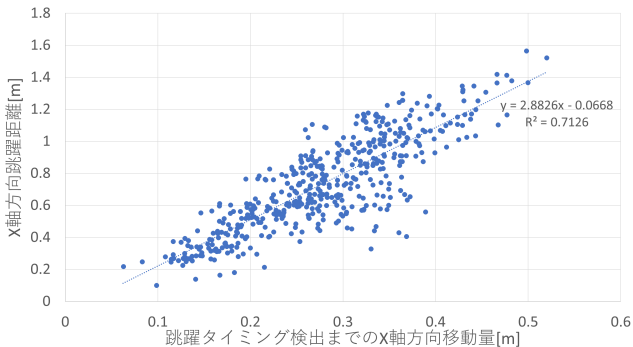


図 6：沈み込み検知までの移動量と飛距離の関係

4.1 垂直跳び

評価方法として、男女 6 名のユーザにモーションベースへ搭乗してもらい、5 回ずつ跳躍してもらった。ユーザには事前に数回練習してもらい、充分と感じてから測定を開始するようにした。図 7 に 1 名分の装置に搭乗し跳躍した時のベースの目標値と実測値、ユーザの頭の位置を示す。また、ユーザには事前に装置に搭乗しない状態で跳躍してもらい、その高さの平均値を 6 倍としたものを目標高さとした。図 8 に目標高さを実測値の平均を示す。

図 7 よりユーザの跳躍動作を取得し、ベースが動作していることが分かる。また、沈み込み検知後一定速度で上昇し、初速度を検知してからは滑らかに放物線軌道へ移行してきていることが確認された。一方でユーザの頭の動きから、跳躍後に一度停滞してから上昇を再開するという点も発見された。また、実験全体を通して、跳躍を検出できない場面が 2 回見られた。これはメガネがユーザの体やベースによって隠れてしまい、モーションキャプチャによる位置の取得が十分に行えなかったことが原因だと考えられる。

図 8 より、目標値よりも平均して約 40cm 大きく飛ぶ傾向にあることが分かった。対応のある t 検定より p 値は 0.02 であり有意差があるという結果になった。特に No4 や No5 は比較的近い値であるのに対し、No1 のように 70cm 以上離れてしまう場合もあり、ユーザ間での差が大きくなった。また、跳躍後にユーザに感想を述べてもらったところ、「自然な跳躍が出来ていると感じた」「何度か練習するうちにコツを掴んで飛べるようになった」「跳躍時にメガネがずれてしまう」などの意見があった。

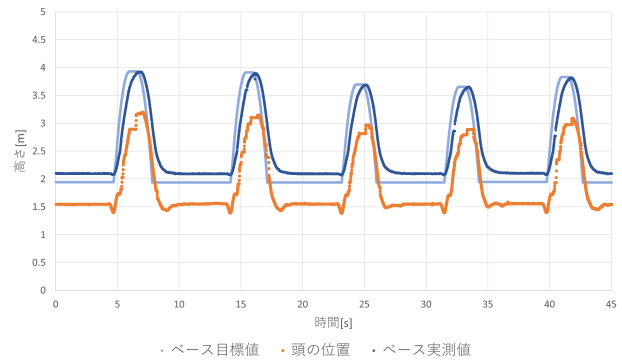


図 7：月面上での Y 軸方向のベースと頭の位置

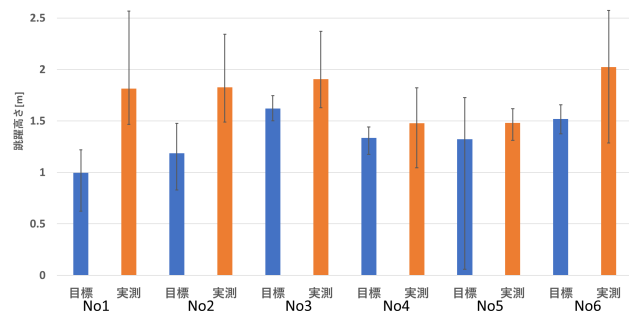


図 8：跳躍高さの目標値と実測値の比較

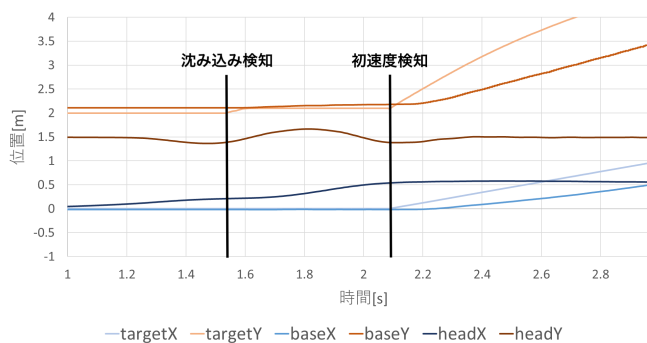


図9：X、Y軸方向のベースと頭の位置の実測値の典型例

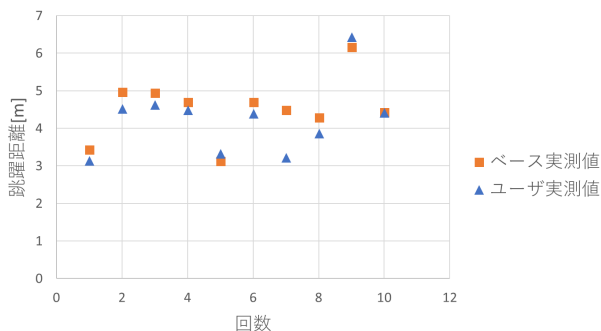


図10：月面上でのベースとユーザの跳躍距離の比較

4.2 斜めジャンプ

X軸方向を追加したシステムでは、地上で跳躍し、ユーザの跳躍距離を予測、ベースによって提示できるかを調査した。図9にX、Y軸方向のベースの目標値と実測値、頭の位置を示す。図10にユーザの跳躍距離を6倍したものとベースの跳躍距離をプロットした散布図を示す。

図9よりY軸方向の放物線移動開始と同時にX軸方向への移動が行われていることが分かる。一方で、Y軸方向は一度上昇した後、大きく停滞してから放物線軌道へ移行している。図10よりベースとユーザの跳躍距離の誤差の平均は28cmとなり、対応のあるt検定の結果よりp値は0.067であることから、両者に有意な差はなく比較的近い値となっていることが確認できる。

5. 考察

垂直跳びに関しては、図7より沈み込みと初速度の検知、モーションベースによる提示が行われていることが確認できた。また、初速度検出までの上昇動作と放物線軌道が滑らかに繋がっていた。一方で、ユーザの頭の位置が跳躍中に一度停滞してから再び跳躍動作を再開している。これはユーザが跳躍できるようにハーネスを吊すロープを緩めた状態で跳躍するため、ロープが張るまでの間ユーザを引き上げる力が発生しないためだと考えられる。また、ベースの移動が指令値に対して遅れることも原因の一つとして考えられるため、モーションベース自体の改善も必要となる。次に、跳躍高さの目標と実測に有意差があることの原因として、初速度検出の前に上昇動作があるためだと考えられる。搭乗時に真上にベースがあることやハ

ーネスを装着するため、地面での跳躍と同じ高さで跳躍することが困難であることも原因の一つだと考えられる。

X軸方向を追加したシステムでは頭の位置情報だけでX軸方向の跳躍距離の予測が可能であることが示唆された。図10から跳躍距離の誤差が30cm以内に収まっており、有意差も無いと言えるため精度としては十分だと考えられる。しかし、X軸方向を追加することでY軸方向の初速度検出に遅れが発生するという問題が明らかになった。現行のシステムでは初速度の閾値を設定していたが、Y軸方向の跳躍高さが予想以上に低くなり閾値を超えないことが原因の一つだと考えられる。今後は前方への跳躍を踏まえて閾値を設定し直す必要がある。

6. むすび

本研究では、ワイヤ駆動モーションベースを用いた月面跳躍体験の提案と実装を行った。Y軸とX軸の成分に分け、それぞれで跳躍軌跡を予測、モーションベースによって提示することで低重力下での跳躍を可能とする手法を考案した。まずY軸方向のみ動作するシステムを実装し、実際にユーザに搭乗してもらい、装置の評価を行った。次にX軸方向の跳躍動作を調べるため、複数のユーザの跳躍データからX軸方向の跳躍距離と沈み込みを検知するまでの移動量に相関があることを発見した。そして近似式から跳躍距離を予測しシステムへ組み込み、動作することを確認した。一方で、前方へ跳躍した場合に高さが予想以上に低くなり検出が困難になるという課題も発見され、X軸方向とY軸方向の両方を合わせて検討する必要が出てきた。

今後は被験者実験を通してX軸方向への移動の検証と合わせて、Y軸方向の挙動についてもさらに詳しく調査をしていく予定である。また、映像と組み合わせることで臨場感を高め、月面シミュレータなどとして活用することを目標に研究を進める。

参考文献

- [1] 廣瀬通孝, 大塚隆治, 広田光一: モーションベースを利用した前庭感覚表現に関する基礎的研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol.1, No.1, pp.16-22, 1996
- [2] Timothy M. Griffin, Neil A. Tolani, and Rodger Kram, "Walking in simulated reduced gravity: mechanical energy fluctuations and exchange", Journal of Applied Physiology, Vol.86, No.1, 1999.
- [3] 池田達彦ら: 微小重力環境下における歩行特性解析に向けた追従式免荷装置の開発 (リムレスホイールを用いた有効性の検証), 日本機械学会論文集(C編), 78巻 790号(2012-6), pp.2119-2130, 2012
- [4] 高鳥光, 圓崎祐貴, 矢野博明, 岩田洋夫: 大規模没入ディスプレイ LargeSpace の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.3, pp.493-502, 2016