



Torus Treadmill における全方向歩行による UAV の操縦

甲斐繁¹⁾, 内藤友貴¹⁾, 矢野博明²⁾, 岩田洋夫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, s_kai@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系知能機能工学域 (contact@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

概要: 本研究は人間の最も生得的な移動手段である歩行動作と UAV(無人航空機)の飛行を同期させ、UAV が撮影した映像を提示することで、遠隔地を歩行する感覚の生成を目指す。全方向に無限に歩行できるロコモーションインタフェース, Torus Treadmill と全周映像を提示できる Rear Dome 1600 を用いることで歩行動作により UAV がいる遠隔地を自分の足で歩き回ったような感覚を提示する。試作したシステムにおいて曲線的な飛行経路を描くように歩行した場合の提示性能を評価した。

キーワード: Torus Treadmill, ロコモーションインタフェース, UAV, テレイグジスタンス

1. 諸言

人間にとって歩行とは最も生得的な移動手段である。歩行動作によって移動ロボットを操縦し、あたかも遠隔地を歩いている感覚を生成できるシステムの構築を目指す。Unmanned aerial vehicle(UAV)は飛行型の移動ロボットであり、地面を走行する移動ロボットよりも路面の状況に左右されずに移動できる。また、UAV の一種であるマルチコプタはホバリングや任意方向への細かな移動ができるため人間の動きに追従することが容易で、カメラを搭載することで人間の視線と同じ高さの映像を撮影することができる。歩行動作により UAV を操縦し、UAV が撮影した映像を提示することなどにより、遠隔地を歩いている感覚を生成できると考えられる。

UAV の一般的な操縦方法として、ジョイスティックなどのコントローラを操作し、UAV が撮影した映像をディスプレイに表示する方法が挙げられる。しかし、ジョイスティックによる操作により遠隔地の状況を必ずしも正確に把握できるわけではない。バーチャル空間において、視点移動にジョイスティックを用いた場合と歩行動作を用いた場合、歩行動作を用いて視点移動を行なった方が正しく距離・方向を正しく知覚できることが確かめられている[1]。UAV の操縦においても身体の移動を伴う方法が有効であることが知られている。例えば、樋口らは操縦者の頭部の動きと UAV の動作を同期する操作手法を提案しており、身体動作を用いることで UAV の操作性が向上することを示している[2]。これらのことから、遠隔地を歩いているような感覚を得るためには、歩行動作を行なうことが有効と考えられる。この場合、歩行による身体移動が

Shigeru KAI, Yuki NAITO, Hiroaki YANO,
and Hiroo IWATA

伴うため、UAV を飛行させたい空間と同じ、もしくはそれ以上の広さを持つ空間が操縦者側に必要となる。そこで、歩行動作を利用しながらも、操縦者側に広い空間を必要としない方法が求められる。

樋口らは操縦者が 1[m]動いたときにドローンを 2[m]動かすことで、操縦者の移動量を 2 倍に拡大した位置へ UAV を飛行させる手法を提案している。この手法では UAV の飛行空間より操縦者側に必要な空間を小さくすることができるが、倍率を 4 倍以上にすると操作が難しくなり目標の地点で止まることが難しい[3]。吉田らはジェスチャ動作により UAV を任意の方向に飛行させる手法を提案している[4]。この手法ではその場を移動することなく UAV を操縦できる。歩行とジェスチャを組み合わせれば操縦者側の空間より広い範囲へ操縦できるものの、ジェスチャによりドローンが移動した区間においては遠隔地を歩いた感覚が得られるとは言えない。

そこで我々は全方向に無限に歩行できるロコモーションインタフェース Torus Treadmill と全周映像を提示できる没入型ディスプレイ Rear Dome 1600 を用いることにより、歩行動作を用いながらも、歩行者側の空間の広さに制限を受けずに UAV を飛行させる手法を考案した。プロトタイプシステムを用いて歩行したとき、直線的な経路の場合、操縦者の歩行経路と UAV の移動経路が概ね一致したことが示唆され、目標地点に到達できることを示した[5]。しかし、通常の生活環境では曲線経路を歩行する場面が多々あるため、本稿では曲線経路における性能を評価した。

2. Torus Treadmill と UAV を用いた遠隔地の歩行感覚生成

提案手法の概要を図 1 に示す。UAV が撮影した遠隔地

の映像が没入型ディスプレイに表示され、表示された映像を見ながら Torus Treadmill 上を歩行するとそれに連動し UAV が飛行する。Torus Treadmill は複数のトレッドミルを数珠つなぎにした装置である。各トレッドミルの回転と、数珠つなぎにしたトレッドミル群の回転を組み合わせることで任意の方向に無限に続く床面をつくり出すことができる。Torus Treadmill の上で歩行する人の位置を距離画像センサにより取得し、歩行を打ち消す方向に床面を動かすことで、歩行感覚を提示できる。ドローンには全天球カメラを搭載し、その映像を没入型ディスプレイに表示する。本手法では UAV の移動を把握しやすくするため、視野全体に広く映像を提示できるシステムであることが望ましいことから、ヘッドマウントディスプレイではなく没入型ディスプレイを使用する。歩行動作を用いて UAV を操縦する利点を以下に示す。

- ・人間の生得的な移動手段である歩行動作を利用するため、自分が歩いて移動するような感覚を得られる。
 - ・歩行動作から移動距離・方向を把握できる。
 - ・UAV を利用するため、路面状況に左右されず、人が歩行できない場所を歩く体験が可能である。
- また、Torus Treadmill における歩行動作では身体の位置が移動しないため、次のような利点がある。
- ・設置式の力覚提示装置などを併用できる。
 - ・大型の医療機器が必要な人（酸素ポンプが必要な慢性呼吸不全の患者など）も、医療機器を Torus Treadmill の近くに設置できるため、気軽に外出体験ができる。

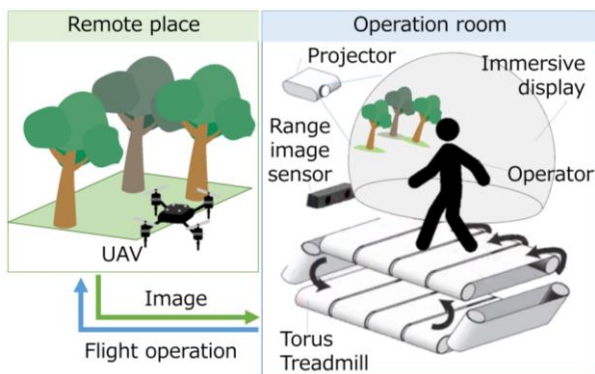


Fig. 1 Proposed method

3. プロトタイプシステム

プロトタイプシステムは操縦者の位置検出と歩行の引き戻しを行なう Torus Treadmill, UAV の位置制御と映像撮影を行なう UAV 制御システム, 操縦者に映像を提示する Rear Dome 1600 の 3 つのサブシステムから構成される。各機器は図 2 のように接続されている。Torus Treadmill と Rear Dome 1600 の外観を図 3 に示す。

3.1 Torus Treadmill

Torus Treadmill は幅 340[mm],長さ 1500[mm]のトレッドミルを 14 台数珠つなぎにして 1500[mm]x1500[mm]の全方向可動床を構成したものである。各トレッドミルの回転と数珠つなぎにしたトレッドミル群の回転を組み合わせることで任意方向の動きを実現している。設計最高速は各トレッドミルの動作方向は 3.8[m/sec],トレッドミル群の動作方向は 1.2[m/sec]である。Microsoft 社製の距離画像カメラ Kinect v2 を 2 台用いて歩行者を撮影し、得られた距離画像を制御 PC で処理することにより、歩行者の位置を検出する。歩行者をトレッドミルの中央に引き戻すように床面を動かすことで歩行を打ち消す。床面の移動量が歩行者の位置に相当する。

3.2 UAV 制御システム

まず、システムの構成について述べる。UAV には図 4

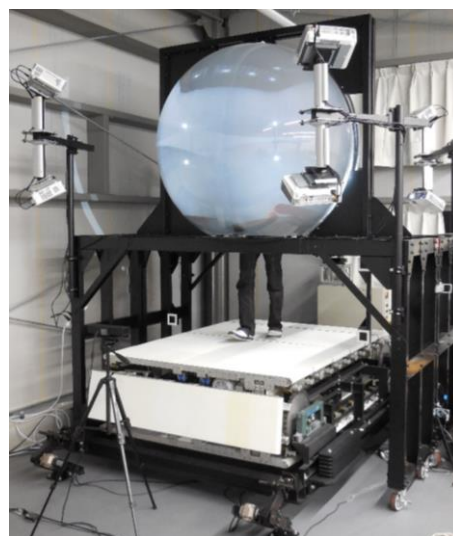


Fig. 3 Torus Treadmill and Rear Dome 1600

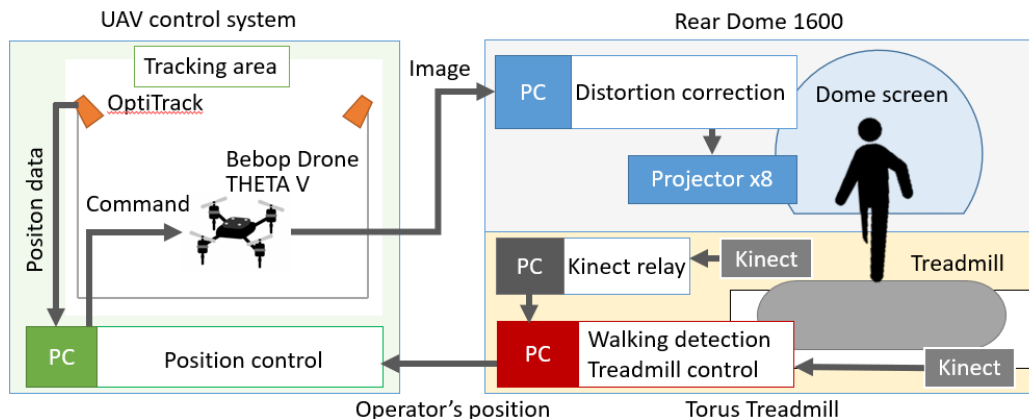


Fig. 2 System configuration

の Parrot 社製 Bebop Drone (以降, ドローン) を採用した。このドローンはソフトウェア開発用に SDK が公開されており, 無線 LAN で接続した PC から制御できる。Bebop Drone は *roll*, *pitch*, *yaw*, *gaz* という 4 つの移動パラメータを持ち, 無線 LAN 接続でこのパラメータを指定し操縦する。*roll* は左右の移動, *pitch* は前後の移動, *yaw* はその場での旋回, そして *gaz* は高さ方向の移動を指示するパラメータである。*roll*, *pitch* はそれぞれの最大角度に対するパーセンテージ, *yaw*, *gaz* は最大 *yaw* 回転角速度, 最大鉛直方向速度に対するパーセンテージである。このドローンに株式会社リコー製の全天球カメラ THETA V を搭載した。無線 LAN 接続でライブストリーミングが可能で 1024x512, フレームレート 30[fps] の Motion JPEG 形式の映像を送信できる。本システムでは LAN 経由で, Rear Dome 1600 の PC へ映像を転送した。また, 位置制御を行うためドローンに再帰性反射マーカ 4 つを取り付け, オプティトラック・ジャパン株式会社製の光学式モーションキャプチャシステム OptiTrack を利用してトラッキングした。奥行き 25[m], 幅 15[m], 高さ 8[m] のトラッキングエリアを準備した。次にドローンの制御方法について述べる。図 5 に水平方向のドローン, 操縦者の位置とドローンの制御パラメータの関係を示す。時刻 i におけるドローンの水平方向位置を D_i , 操縦者の水平方向位置を H_i とし, その差を E_i とする。説明を単純にするため, まずドローンが Y 軸方向を向いている場合の *roll*, *pitch* の計算式を式(1)に示す。ドローンが Y 軸方向を向いていないときの

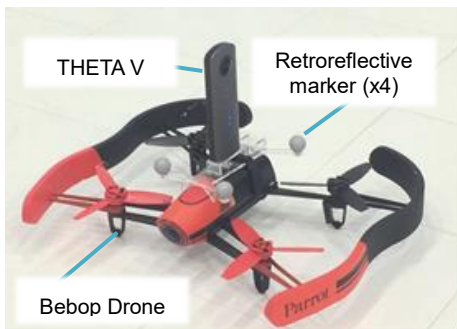


Fig. 4 The Bebop Drone attached retroreflective markers and the THETA V

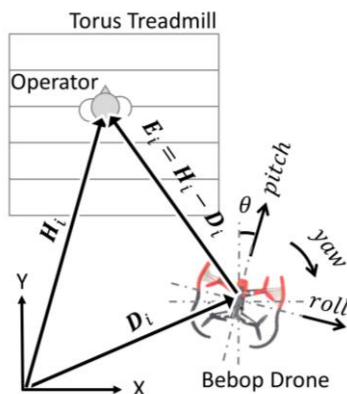


Fig. 5 Relationship between the operator's coordinate and the Bebop Drone's coordinate

roll, *pitch* の計算式と区別するためそれぞれ $roll'$, $pitch'$ と表記している。 k_p , k_D は P ゲイン, D ゲインを, Δt は制御周期を表している。

$$\begin{pmatrix} roll' \\ pitch' \end{pmatrix} = k_p E_i + \frac{k_D}{\Delta t} (E_i - E_{i-1}) \quad (1)$$

ドローンが Y 軸を向いていないときの *roll*, *pitch* は, 式(1)の計算結果とドローンの向き (*yaw* 方向の回転角) θ から, 式(2)のように計算する。

$$\begin{pmatrix} roll \\ pitch \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} roll' \\ pitch' \end{pmatrix} \quad (2)$$

また, カメラの視点を人の視点の高さに合わせるために高さ方向の制御を, 映像が回転しないようにするために *yaw* 方向の姿勢制御を行なう。ドローンの高さ方向の移動パラメータ *gaz* は目標高さ h_e , ドローンの高さ h_{di} より, 式(3)のように計算する。 k_{Ph} は P ゲインである。

$$gaz = k_{Ph}(h_e - h_{di}) \quad (3)$$

yaw 方向の回転パラメータ *yaw* はドローンの向き θ から式(4)のように計算する。 k_{Py} は P ゲインである。

$$yaw = k_{Py}\theta \quad (4)$$

3.3 Rear Dome 1600

視覚刺激により運動の状態を知覚させるには広い視野角に映像を表示できるシステムを用いることが望ましい。そのため本システムではドームスクリーンを用いた没入型ディスプレイ Rear Dome 1600 を採用した。Rear Dome 1600 は直径 1600[mm] のドームスクリーンとそれに映像を投影する 8 台のプロジェクタ, 投影時の映像のひずみを補正する PC から構成されており, 仰角 45[deg] から伏角 45[deg] の範囲に映像を表示できる。なお, THETA V から転送される映像を表示するとき, 通信と投影歪み補正により 0.32[s] (SD=0.11) の遅延が生じる。フレームレートは 22.4[fps] (10[sec] 平均) 程度である。

4. システム評価実験

<実験の目的> プロトタイプシステムにおいて, 操縦者が遠隔地の状況を確認しながら曲線的な経路を描くように歩行した際, 操縦者の歩行経路とドローンの飛行経路が一致し, 遠隔地を歩行する感覚を提示できることを確かめる。
<実験方法> 図 6 のように 5[m] 間隔をあけてパイロンを 2 つ設置した。パイロンは青色で図 7 に示す形状である。Rear Dome 1600 には図 8 のようにドローンが撮影した映像が映し出され, 実験参加者はこの映像を見ながらパイロンの周りを 8 の字を描くように Torus Treadmill 上で歩行した。実験参加者は実験の直前に 3 分程度, 本システムを用いてドローンを操縦する練習を行った。なお, 操縦者の安全を考慮し Torus Treadmill の最大速度は 0.60[m/s] とした。なお, 実験参加者は 3 名で, 以降操縦者 1, 操縦者 2, 操縦者 3 と呼ぶ。ドローンの飛行高度は THETA V のレンズの位置が実験参加者の視線の高さに一致するように設定した。操縦者 1, 2, 3 の視線の高さはそれぞれ 1.50[m],

1.72[m], 1.63[m]であった。

＜結果と考察＞ 図 9 に操縦者の歩行軌跡とドローンの飛行軌跡を示す。2つのパイロンの周りを8の字を描くようにドローンを操縦できたことが確認できる。図 9(a)から、歩行軌跡に追従してドローンが飛行したことがわかる。

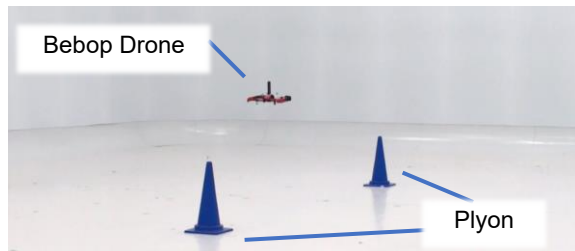


Fig. 6 Pylons and a flying Bebop Drone in Remote site

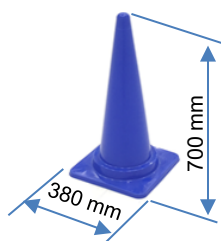


Fig. 7 Pylon

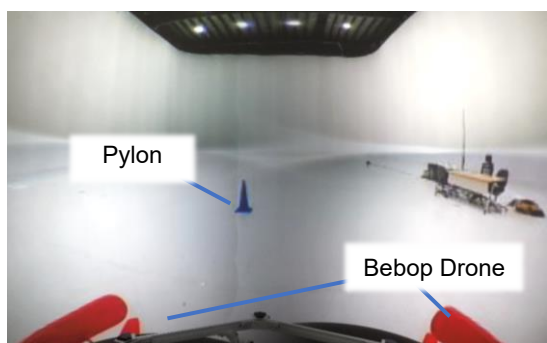
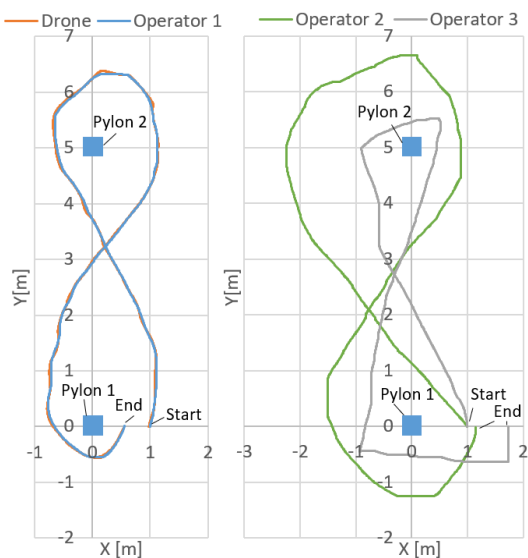


Fig. 8 Picture displayed on the Rear Dome 1600



(a) Operator 1 (b) Operator 2 and Operator 3

Fig. 9 Trajectories of operators and the Bebop Drone

操縦者 1 の位置とドローンの位置の相関係数を計算すると X 方向は 0.9987, Y 方向は 0.9997 であることから、操縦者の位置とドローンの位置がおおむね一致していたことが示唆される。このことから、操縦者の動きに対応した歩行感覚が提示でき、かつ操縦者の位置に相当する遠隔地の映像を提示できたことが確かめられた。なお、2つのパイロンを周回するのに要した時間は操縦者 1, 2, 3 の順に 60[sec], 109[sec], 93[sec]であった。なお実験参加者からは「歩く向き、速さを変えたときトレッドミルとドローンが早く反応した」などの自然な歩行感覚を得られたことを示唆するコメントもあるものの、「体を前に進めない」と歩行できないため違和感がある」や「大腿では歩きにくい」といった歩きにくさを指摘するコメントもあった。歩行のしにくさは Torus Treadmill の性能に起因すると考えられる。また、映像から距離感が分かりにくいこと、ドローンの揺れにより映像が揺れることなど、映像への違和感も指摘された。カメラの揺れはモーションキャプチャにより計測できるため、今後は揺れを補正する改良を行なう。

5. 結言

Torus Treadmill 上での歩行動作により遠隔地を歩行する感覚を提示するプロトタイプシステムを構築した。0.60[m/s]以下の歩行速度において、曲線的な軌跡を描くように歩行でき、その際操縦者の歩行経路と UAV の位置がおおむね一致している。実験参加者のコメントより、自然な歩行感覚を提示できる場合もあるが、Torus Treadmill の動作や映像提示に関して改良が必要な点も明らかになった。これまでに直線的な経路を通り目標地点に到達できることを確かめており、歩行速度の上限はあるものの直線的、曲線的な歩行、目標地点への到達という基本的な歩行動作に対応できることが分かった。今後は他の操縦方法との比較実験などにより本手法の有用性を確認したい。

参考文献

- [1] Iwata, H. and Yoshida, Y. : Path Reproduction Tests Using a Torus Treadmill, PRESENCE Vol.8, No.6, pp.587-597, 1992.
- [2] 樋口啓太, 暦元純一 : Flying Head:頭部動作との同期による無人航空機の操作メカニズム, インタラクション 2013, pp. 87-94, 2013.
- [3] 樋口啓太, 暦元純一 : 移動感覚の拡張が可能なフライングテレプレゼンスプラットフォーム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19,No.3,pp.397-404,2014.
- [4] 吉田成朗ほか : ジェスチャ操作型飛行ロボットによる身体性の拡張, インタラクション 2012, pp.403-408, 2012.
- [5] 甲斐斐ほか : Torus Treadmill における歩行動作による UAV の操縦, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 講演論文集(DVD-ROM), 2P2-H13, 2018.