



片手持持操作可能な浮遊型バルーンインターフェース

Single-handedly Graspable Midair Balloon Interface

古本拓朗¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Takuro FURUMOTO, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, furumoto@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, Masahiro.Fujiwara@ipc.i.u-tokyo.ac.jp, {yasutoshi_makino, hiroyuki_shinoda}@k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では, 空中を動く仮想物体を直感的に操作することを目的とした浮遊型バルーンインターフェースを提案する. ユーザーは空中に浮かぶバルーンを片手で直接掴んで動かすことで, 対応するオブジェクトの位置を操作することができる. 小型のバルーンを, 高速カメラと冗長に配置された空中超音波フェイズドアレイを用いてフィードバック制御することにより, 接触・操作時における安定浮遊と, 従来よりも俊敏な動作を実現した.

キーワード: 空中インターフェース, 空中超音波

1. はじめに

AR/VR において空中に浮かぶ仮想物体の触覚・力覚を表現するための方法に, 空中に浮遊する実物体をインターフェースとして用いるものがある. ユーザーは仮想物体に対応づけられた実物体を直接手で触ったり操作したりすることで, 接触時の触覚や操作時の力覚・体性感覚を感じながら仮想物体とインタラクションを行うことができる. 特に近年, ドローンが普及したことにより, 人間スケールの空間内で物体を高速に飛行させることが容易になった結果, 多数の空中実物体インタラクションが提案されるようになった [1]. その応用範囲は拡張現実 [2] や触覚提示 [3], 拡張スポーツ [4] など多岐に及ぶ.

空中を飛行する物体に直接接触してインタラクションを行う際には, 接触時や衝突時の身体的・心理的安全性を確保することが重要となる. 衝突時の安全性と移動速度は相反する要求である. これまでの研究では, いかにローターブレード等の危険な機械部品との接触を回避するかという観点での議論が中心であり [5], 移動速度と衝突時安全性を両立することは現状困難であり, 触覚インタラクション中はドローン自身の速度を小さくせざる.

衝突時の安全性を担保する方法として, 空中超音波により 3次元制御されたバルーン [6] をインターフェースとして用いる方法が挙げられる. (以降, これをバルーンインターフェースと呼ぶ.) バルーンインターフェースは環境に配置された超音波デバイスによって外部から駆動されており, バルーンはアクチュエータやバッテリー等の機械部品を一切搭載していないため, たとえ高速で衝突したとしても外傷を与える心配がない. 加えて, 超音波デバイスは 1 m 以上離れた場所のバルーンを駆動できるため, 人間スケールのワークスペースを得られることが, これまでの研究で確か

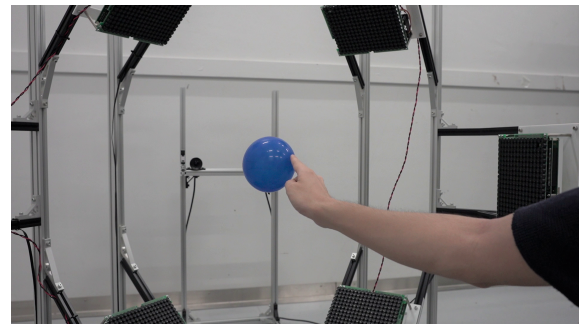


図 1: 浮遊型バルーンインターフェース.

められている [6, 7]. バルーン・インターフェースを用いた触覚提示も試みられており, 古本・砥出らによりバルーンを用いた接触感提示システムが開発されたが [8], 仮想物体の把持や操作は実現されていない. 加えて, これらの研究では 200 mm/s 以下の低速な領域でバルーンを制御しており, これより高速な領域での使用は検討されていない.

本研究では, 空中を動く仮想物体を直感的に把持・操作することを目的とした浮遊型バルーンインターフェースを開発した. ユーザーは周囲に配置された 3次元位置制御された直径 10 cm のバルーンを, 片手で直接掴んで操作することができる. バルーンはヘリウムガスを封入することで浮遊しており, 周囲に配置された空中超音波フェイズドアレイ (Airborne ultrasound phased array, AUPA) により駆動される. 小型のバルーンを高速カメラと冗長に配置された AUPA を用いてフィードバック制御することで, 従来よりも俊敏な動作と把持操作時の安定浮遊を実現した.

2. プロトタイプシステムの構成

2.1 バルーン駆動システム

我々は、Inoue らによって開発された AUPA を使用する (図 2) [9]. 本デバイスには、40 kHz の共振周波数をもつ 249 個の振動子が格子状に配列されている. 今回製作したプロトタイプでは、本デバイスを用いて集束超音波をバルーンに当てることにより、物体を駆動する. 集束超音波が球体に当たると、物体には斥力方向の放射力が加わる. 放射力は音圧の 2 乗に比例するので、デバイスの駆動音圧を調整することで放射力の大きさを調節することができる.

図 3 にプロトタイプにおける AUPA の配置と座標系定義を示す. 本システムには 11 基の AUPA が原点から距離 528 mm の位置に配置されている. ユーザーは主に AUPA の配置されていない +y 方向からワークスペース内に手をを入れてバルーンを操作できる.

超音波ビーム間の干渉を防ぐために、各 AUPA は時分割で駆動される. 高速で切り替えながら適切な振幅で AUPA を駆動することにより、時間平均をとると PID 制御されるような力がバルーンに与えられる. 位置 \mathbf{r} のバルーンに力 \mathbf{F}_{tgt} を与えるような各 AUPA の駆動振幅 p_i は次の式を解くことにより与えられる.

$$\sum_i F_M \left(\frac{p'_i}{p_M} \right)^2 \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} + \mathbf{F}_g = \mathbf{F}_{\text{tgt}} \quad (1)$$

$$\sum_i p_i'^2 \leq p_M^2 \quad (2)$$

$$0 \leq p'_i \leq p_M \quad (3)$$

$$n = \sum_i H_0(p'_i) \quad (4)$$

$$p_i = \sqrt{n} p'_i \quad (5)$$

ここで、 p_M は AUPA の最大駆動振幅、 F_M は AUPA が最大振幅で駆動された際に与える放射力の大きさ、 i は AUPA の番号、 \mathbf{r}_i は i 番目の AUPA の位置、 \mathbf{F}_g はバルーンにかかる重力と浮力の合力 n は駆動する AUPA の個数、 $H_0(x)$ は AUPA が駆動させるか否かを表す次の関数である.

$$H_0(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0). \end{cases} \quad (6)$$

プロトタイプの実装では、与えるべき力の方向と放射力方向のなす角が 80 以下となるものだけに駆動する. AUPA の候補を絞った後、式 1 の両辺の差を最小にするような $p_i'^2$ を数値的に求めることで駆動振幅を算出している. 駆動 AUPA の切り替えは 100 fps で一周し、駆動 AUPA と駆動振幅を決定するコマンドは PC から 100 fps で送信されている.

2.2 トラッキングシステム

バルーンの位置計測は、-y 方向に配置された 2 基の高速カメラ (Ximea MQ003CG-CM) を用いて行われる. それぞれのカメラで得たカラー画像を HSV 色空間に変換した後、予め用意したバルーン画像の色相ヒストグラムを逆投影し閾値処理を施すことで、バルーンの領域を抽出した二値化画像を生成する [10]. その後、各カメラの二値化画像の

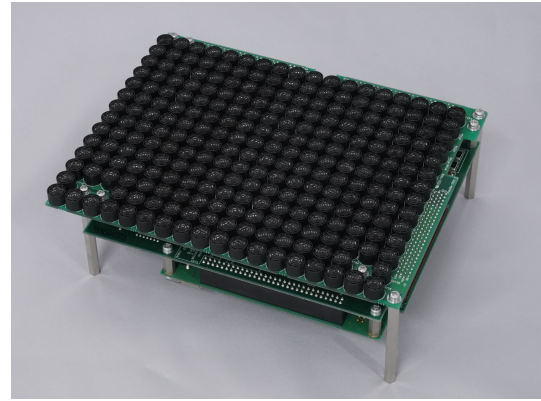


図 2: 空中超音波フェイズドアレイ.

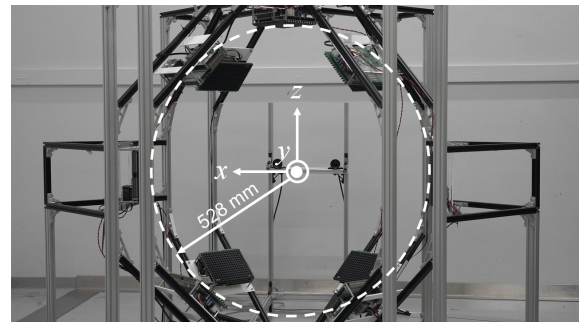


図 3: 空中超音波フェイズドアレイの配置と座標系定義.

画像重心を使って三角測量を実施し、バルーンの 3 次元位置を計測する. プロトタイプの計測頻度は 159 Hz だった.

3. 位置制御性能の評価実験

3.1 ワークスペース

我々は、実験的にワークスペースの大きさを確かめた. 原点から x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸方向に 50 mm ずつバルーンを移動させ、安定して浮遊できる最も遠い距離を記録した. その結果、プロトタイプは、 x 軸方向、 z 軸方向に原点から 350 mm 離れた点において誤差 50 mm 以内で浮遊できることが分かった.

3.2 直線軌道

x 軸方向、 z 軸方向の移動に要する時間を計測した. x 軸方向に関しては点 $[-250 \ 0 \ 0]^T$ mm と点 $[250 \ 0 \ 0]^T$ mm の間を、 z 軸方向に関しては点 $[0 \ 0 \ -250]^T$ mm と点 $[0 \ 0 \ 250]^T$ mm の間を 7 往復させ、目標位置からの誤差が x , y , z 方向のそれぞれについて 50 mm 以下に収束するまでの時間を計測した. このときの位置履歴の例を図 4, 図 5 に示す. また、各方向について収束に要した時間の平均値を表 1 に示す. また、水平移動に関して、目標地点からの距離が $0.368 \times 500 = 184$ mm となる値を用いて時定数を見積もると 0.864 秒となっており、先行研究 [6] におけるバルーン制御で報告された値 (2.50 秒) と比較して 65.5% 減少している. そのときのステレオカメラで計測した速度 (5 フレームの時間平均) のピーク値は平均 890 mm/s に達しており、従来研究で報告された値の 4~5 倍となっている. 最高速度は経路に依存するため単純な比較はできない点に注意すべきだが、これらの

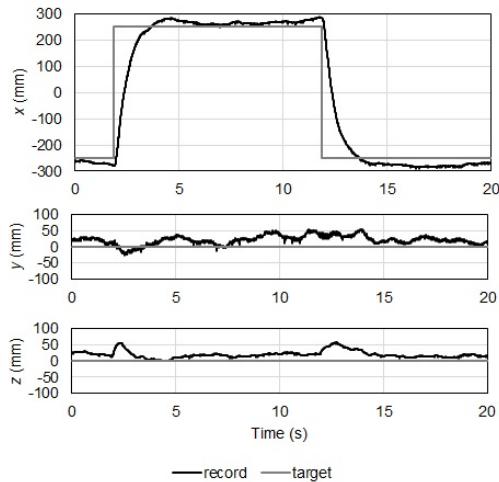


図 4: x 軸方向に沿った直線軌道の履歴.

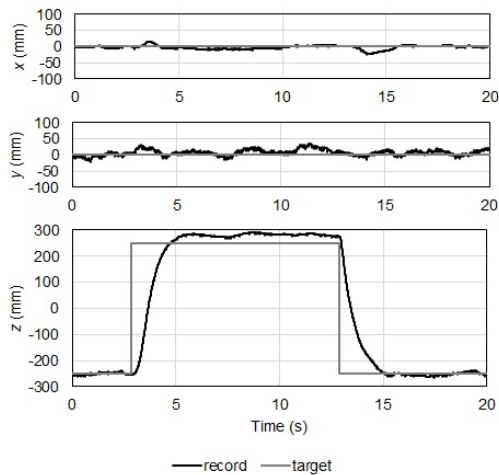


図 5: z 軸方向に沿った直線軌道の履歴.

事実から俊敏性が従来よりも大幅に向上したことが分かる.

3.3 円軌道

3.2 で述べた直線的な軌道だけでなく、曲線的な軌道に沿って位置制御できることを確かめるため、円に沿ってバルーンを制御する実験を行った。目標軌道は、原点を中心とする xz 平面上に描かれた半径 150 mm の円とした。角速度は、2 周期ごとに 0.33 rad/s から 1.66 rad/s まで段階的に上昇させた。そのときの位置履歴を図 6 に示す。この図から、曲線に沿った制御に成功していることが分かる。

表 1: 500 mm の直線移動に要した平均時間

方向	平均収束時間 (秒)
+ x	1.36
- x	1.29
+ z	1.44
- z	1.54

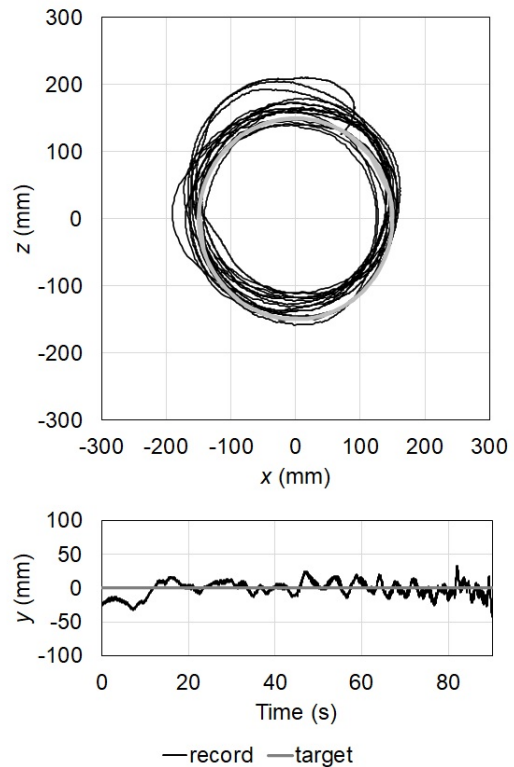


図 6: 円軌道の履歴。(上) xz 座標。(下) y 座標の履歴.

4. バルーン把持操作実験

4.1 概要と目的

複数の被験者に、実際にバルーン・インターフェースを片手で把持・操作させ、それが可能であることを確かめた(図 7)。本実験の目的は、把持操作中に発生する風や接触、振動子のオクルージョン等の影響下でバルーンが安定に浮遊できるか否か、および、空中に浮かぶ非常に軽量の物体をユーザーが自由に把持操作できるのか否かを調べることである。

4.2 手順

実験は次のステップで行われた。

1. 被験者は原点に浮遊するバルーンを把持し、完了したら報告する。
2. 被験者の正面に置かれたモニターに表示された目的位置にバルーンを手で移動させ、目的位置からの誤差が x , y , z 方向にそれぞれ 50 mm 以内となるように 5 秒間維持する。このとき、モニターには指定位置と現在位置の相対位置が表示されている
3. モニターに表示された指示に従って、被験者は手を離し、ワークスペースから手を出す。動作が完了したら申告する。
4. バルーンは指定位置で維持されるように 10 秒間浮遊された後、原点へ移動する。

バルーンを掴んでいない、タスク 1, 4 の間にバルーンの x 座標, y 座標, z 座標のいずれかが 3.1 で述べたワークスペースから 50 mm 以上離れた場合、ワークスペース内

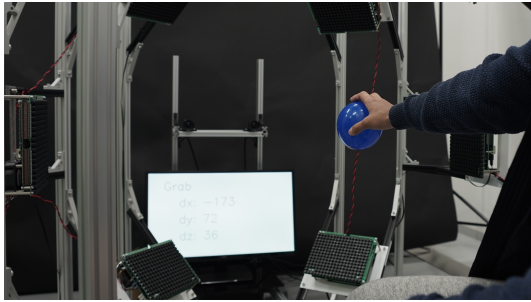


図 7: バルーン操作の様子。

に復帰することが不可能と判断し、タスク失敗とみなした。指定位置は $[200\ 0\ 0]^T$ mm, $[200\ 0\ 0]^T$ mm, $[-200\ 0\ 0]^T$ mm, $[0\ 100\ 0]^T$ mm, $[0\ -100\ 0]^T$ mm, $[0\ 0\ 200]^T$ mm, $[0\ 0\ -200]^T$ mm の中から選ばれた。上記タスクは各指定位置につき 5 回ずつ、合計 30 回ランダムな順番で行われた。本実験には被験者として健康な男性 9 名が参加した。

4.3 結果と考察

操作タスクの成功率は 94.8% だった。また、操作タスクの成功した場合について、操作後の位置誤差は x 方向に 65 mm 以内、 y 方向に 50 mm 以内、 z 方向に 120 mm 以内に収まっていた。失敗のうち 93% の内容は、ユーザーから見て奥方向 ($-y$ 方向) へバルーンをつき飛ばしてしまうというものだった。つき飛ばしてしまったバルーンをワークスペース内へ押し戻せるように $-y$ 方向に AUPA を配置することで、この失敗を防ぎ成功率を向上させることができると考えられる。 z 方向の誤差が大きいのは、実験中にバルーンからヘリウムガスが抜けて浮力が変化したことためだと思われる。ヘリウム漏れが少ない素材のバルーンを使ったり、制御ゲインを調整したりすることで、 z 方向の位置誤差を小さくできると考えられる。

5. おわりに

本論文では片手持続操作可能な浮遊型バルーンインターフェースを提案した。直径 10 cm のバルーンを、冗長に配置された空中超音波フェイズドアレイと高速カメラを用いて 3 次元制御することにより、片手での把持操作と従来よりも高速な動作を実現した。今後は提案インターフェースを応用した空中インタラクションを開発する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18J13314, JP16H06303 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Markus Funk. Human-drone interaction: Let's get ready for flying user interfaces! *Interactions*, 25(3):78–81, April 2018.
- [2] Wataru Yamada, Kazuhiro Yamada, Hiroyuki Manabe, and Daizo Ikeda. iSphere: Self-Luminous

Spherical Drone Display. *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17*, 2017.

- [3] M Abdullah, M Kim, W Hassan, Y Kuroda, and S Jeon. HapticDrone: An encountered-type kinesthetic haptic interface with controllable force feedback: Example of stiffness and weight rendering. In *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pages 334–339, 2018.
- [4] Kei Nitta, Keita Higuchi, and Jun Rekimoto. Hoverball: Augmented sports with a flying ball. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference, AH '14*, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [5] Wataru Yamada, Hiroyuki Manabe, and Daizo Ikeda. Zerone: Safety drone with blade-free propulsion. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, pages 365:1–365:8, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [6] Takuro Furumoto, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Three-dimensional manipulation of a spherical object using ultrasound plane waves. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(1):81–88, 2019.
- [7] Takuro Furumoto, Mitsuru Ito, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda, and Takaaki Kamigaki. Three-dimensional interaction technique using an acoustically manipulated balloon. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, SA '19*, page 51–52, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [8] Takuro Furumoto, Yutaro Toide, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Encounter-type haptic feedback system using an acoustically manipulated floating object. In Hiroyuki Kajimoto, Dongjun Lee, Sang-Youn Kim, Masashi Konyo, and Ki-Uk Kyung, editors, *Haptic Interaction*, pages 183–186, Singapore, 2019. Springer Singapore.
- [9] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Scalable Architecture for Airborne Ultrasound Tactile Display. In *AsiaHaptics*, Lecture Notes in Electrical Engineering, pages 2035–2040, Singapore, 2016. Springer.
- [10] Michael J. Swain and Dana H. Ballard. Indexing via color histograms. In Arun K. Sood and Harry Wechsler, editors, *Active Perception and Robot Vision*, pages 261–273, Berlin, Heidelberg, 1992. Springer Berlin Heidelberg.