複数の空気噴流による平面上物体の非接触操作 (4本のエアジェットノズルを用いた複数物体制御方式の実験的検討)

松下 翼^{*1}, 土橋 直晃^{*2}, 岩城 敏^{*3}, 高木 健^{*4}, 小作 敏晴^{*3}

Contactless object manipulation using multiple air jets on planar surface (Experimental case studies of control method for the multiple objects using four air jets nozzles)

Tsubasa MATSUSHITA^{*1}, Naoki TSUCHIHASHI^{*2}, Satoshi IWAKI^{*3}, Takeshi TAKAKI^{*4}
and Toshiharu KOSAKU^{*3}

^{*1,*3} Hiroshima City Univ. Graduate school of Computer and Information Sciences

3-4-1 Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima 731-3194, Japan

^{*2} Hiroshima City Univ. Dept. of Computer and Information Sciences

3-4-1 Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima 731-3194, Japan

^{*4} Hiroshima Univ. Graduate school of Engineering

1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, Hiroshima 739-0046, Japan

Received 21 August 2015

Abstract

We present a method for contactless manipulation of multiple small objects in a plane using multiple air jets. When the objects are initially clustered as a group, the group's center of gravity is used as a representative point and the entire group is manipulated. When the objects are initially scattered, the object farthest from the goal is selected and individually controlled. Four jets allowing control of airflow rate and angle are used for a position manipulation experiment with five small balls, and the efficacy of the proposed method is compared and discussed.

Key words : Air jets, Contactless, Object manipulation, Multiple objects, Planar

1. 序 論

近年、空気や水等の流体噴流を用いた物体操作技術が盛んに研究されている (Becker et al., 2009) (Biegelsen et al., 2000), (Davis et al., 2008), (Reed and Miles, 1996). 筆者らもこれまで、物体搬送装置への応用を念頭に、平面上の1つの物体を複数の空気噴流により非接触に操作する研究を行ってきた (岩城 他, 2007) (山本 他, 2009) (Iwaki et al., 2011) (松下 他, 2014). すなわち、複数のエアジェットノズルの風力 (本論文では、エアジェットノズルから噴出する噴流によって物体に作用する流体力を「風力」と呼ぶ) と角度を操作することで、平面上剛体の持つ最大並進2自由度・回転1自由度を制御する方式を提案し実証してきた. 本論文では、これを発展させることで複数の物体の非接触操作方式について論ずる.

エアジェットによる非接触物体操作の技術的特徴として、伝達機構が不要で人体に安全である等の優れた性質がある一方で、原理的に噴流の下流側にしか物体を駆動することができないというデメリットも存在する. このように一方向にしか力を発生することができないユニラテラルアクチュエーションにおいては、1剛体が有するM自由度を操作するには(M+1)個のアクチュエータが必要であり、さらにそれらの位置と姿勢がforce closure条件を満たす必要がある (Iwaki, 1990) (Yoshikawa, 1996). 我々の第1報 (松下 他, 2014) では、(M+1)個のエアジェットノズルをforce closure条件を満たすように配置してM自由度の1剛体操作を実現した. もしこの考え方をそのまま複数物体の制御へ適用するならば、物体の数に比例した夥しい数のノズルが必要となり物体搬

No.15-00459 [DOI:10.1299/transjsme.15-00459], J-STAGE Advance Publication date : 3 March, 2016

^{*1} 広島市立大学大学院情報科学研究科 (〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1)

^{*2} 広島市立大学情報科学部

^{*3} 正員, 広島市立大学大学院情報科学研究科

^{*4} 正員, 広島大学大学院工学研究科 (〒739-0046 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

E-mail of corresponding author: iwaki@hiroshima-cu.ac.jp

送装置として現実的ではない．そこで本論文では，文献（松下 他，2014）で得られた知見を基に，なるべく少ないノズルを用いて，複数の小物体を目標エリアまで移動させるための制御方式を検討することとした．

なお，空気を用いた複数物体の操作技術として，穀物等の小物体を吸い込み，ホース内を移動させる吸引式の物体搬送装置がすでに実用化されている（白水，磯部，2007）．しかしながら，この技術ではバキュームノズルと操作対象物とが極めて近接していないと実効的な吸引力を与えることが不可能である．これに対して，我々の研究ではエアジェットノズルと操作対象物体とが近接していない状況においても物体を操作することが期待できる．

本論文ではこれ以降，2章で制御目的を明確化し，それを達成するための基本戦略について述べる．3章では複数の物体を一個ずつ制御する個別制御方式と，集団的に制御する集団制御方式を提案する．4章では，提案した制御方式を用いた比較実験・考察を行い，5章で本論文のまとめとする．

2. 制御の目的と基本戦略

制御の目的は図1に示すように， N 個のエアジェットノズルの風力と角度を操作することで， n 個の小物体をできるだけ短時間でゴールエリアに追い込むことである．ただし，全ての物体とゴールは，エアジェットアクチュエーションの force closure 条件（吉川，1995, 1996a, 1996b）を満足する位置に存在することを前提とする．また， $\theta_k (1 \leq k \leq N)$ は各エアジェットノズルの噴出角度， a_k は各ノズルの単位方向ベクトル， f_k は風力とする．容易に想像されるように，物体が存在する近傍において，複数の噴流が合流し複雑な非定常乱流場が形成される．さらに，空気噴流の拡散性は1ノズルで複数物体を同時に操作可能という長所がある一方で，操作の必要がない近傍の物体も動かしてしまう．そのため，複数の小物体の個々の挙動に対して流体力学に基づく理論解析を行うことは極めて困難である．そこで本報告では，文献（松下 他，2014）で得られた知見と経験を基に，試行実験をベースに実験的に検討していくこととした．

上記の制御目的を達成するためには，まず，時々刻々と変化する物体の配置（群構成と呼ぶ）を観測し，その群構成で最適な角度 θ_k と風力 f_k を決定する必要がある．この群構成は一塊の集団として扱うことが可能な場合と，ばらばらに分散した場合の2つに大きく分類することが可能であり，それらは制御の進行につれて動的に変化する．このような状況においては，複数の個体一つ一つを個別に制御する戦略と，一塊の物体と捉えて集団的に制御する戦略が考えられる．本報告では，前者を個別制御，後者を集団制御と呼び，この二つの戦略の特徴を明らかにするために，それぞれの制御方式を提案し比較実験を行うこととした．なお，ここで「一塊」とは，全ての物体がゴールエリアサイズ程度に収まる範囲で集中している状態と定義する．

3. 制御手法の提案

本章以降，前提条件として，ノズルの数 $N = 4$ ，物体と平面の間の摩擦が小さい状況に限定し議論を進める．本システムの座標系を図2に示す．各ノズルは正方形の頂点に配置した．なお， $O_i(x_i, y_i) (i = 1 \cdots n)$ は各物体の重心座標を示しており，各物体の速度を $\mathbf{v}_i(v_{ix}, v_{iy})$ とする．各ノズル角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$ はそれぞれ原点の向きを0として反時計回りに正の値をとり，物体の拘束可能な範囲は force closure 条件より，各ノズルを直線で結んだ正方形の内側となる．目標値は座標 (x_G, y_G) から半径 r_G の円の範囲の内側となる．

Fig.1 A conceptual system image for n small objects with N air jet nozzles.

Fig.2 Coordinate systems for multiple small objects with four air jet nozzles.

3・1 提案手法1 (個別制御)

提案手法1(個別制御と呼ぶ)の物体配置の例とフローチャートをそれぞれ図3と図4に示す. 個別制御では物体を1ずつゴールに近づける「物体移動」、拘束可能範囲の外に出ようとする物体を拘束可能範囲内に留める「物体救助」、ゴールエリア内で動いている物体を停止させる「物体停止」の3つの動作を状況に応じて実行させることで物体の位置制御を行う.

(a) 物体移動

物体移動ではゴールから最も遠い個体の識別を行い, 識別された個体を標的とすることで順にゴールに近づける. 標的座標 (a, b) はゴール座標 (x_G, y_G) と n 個の個体の各座標 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$)を用いて, 式(1)のように表す.

$$(a, b) = \operatorname{argmax}_{(x_i, y_i)} (\sqrt{(x_G - x_i)^2 + (y_G - y_i)^2}) \quad (1)$$

(b) 物体救助

物体救助では, 現在のノズル配置で拘束可能な範囲の外に物体が出ようとする時に拘束可能な範囲の内側に留める動作を実行する. 以下の条件式(2), (3), (4), (5) のいずれかに該当する物体の重心座標を標的座標 (a, b) として狙い, 拘束可能範囲内に留める.

$$-x_i + \lambda - \alpha \leq y_i \wedge x_i, y_i \geq 0 \wedge (v_{xi} > 0 \vee v_{yi} > 0) \quad (2)$$

$$x_i + \lambda - \alpha \leq y_i \wedge x_i < 0 \wedge y_i > 0 \wedge (v_{xi} < 0 \vee v_{yi} > 0) \quad (3)$$

$$-x_i - \lambda + \alpha \geq y_i \wedge x_i, y_i \leq 0 \wedge (v_{xi} < 0 \vee v_{yi} < 0) \quad (4)$$

$$x_i - \lambda + \alpha \geq y_i \wedge x_i > 0 \wedge y_i < 0 \wedge (v_{xi} > 0 \vee v_{yi} < 0) \quad (5)$$

これは図3において救出エリアに物体が存在し, かつ速度ベクトルが拘束可能範囲の外側に向かっている物体に該当する.

(c) 物体停止

一度動き出した物体は慣性の法則により自然停止をしない. 物体停止では動いている物体をゴールエリア内で停止させる動作を実行する. 条件式(6)に該当する物体をゴールエリア内で動いている物体と判定し, 物体の重心座標を標的座標 (a, b) として物体を停止させる.

$$(x_i - x_G)^2 + (y_i - y_G)^2 \leq r_G^2 \wedge (v_i \neq 0) \quad (6)$$

各ノズルの噴出角度と風力は標的座標 (a, b) を用いて後に述べる3・3の制御演算で決定する. 上記の物体移動, 物体救助, 物体停止の3つの動作は図4に示す順序で n 個の物体全てがゴールエリアで停止するまで繰り返される. これにより, 物体をそれぞれ目標位置に移動させ停止させることが期待できる.

Fig.3 An example of the object configuration and area division in the case of the proposed individual position control method.

Fig.4 A flowchart for the proposed individual position control method.

3・2 提案手法2 (集団制御)

提案手法2(集団制御と呼ぶ)の物体配置の例を図5に示し,制御のフローチャートを図6に示す.集団制御では,塊として存在する物体集団を一つの仮想物体として捉えてまとめてゴール付近へ移動させる「集団移動」,集団から外れた物体を集団内へ押し戻す「集団合流」,ゴール付近にある調整エリアの物体をそれぞれゴールエリア内に移動させる「微調整」,さらにゴールエリア内で移動している物体を停止させる「物体停止」の4つの動作を状況に応じて実行させることで物体の集団的な位置制御を行う.

(a) 集団移動

集団制御では,操作エリアを,ゴール中心点と各ノズル回転中心とを結ぶ4つの線分によって分割を行い,最も多く物体が存在するエリアを選択する(図5の例においてはエリア3を選択する).選択エリア内の物体全体の中から速度ベクトルがゴール方向へ向いていない物体の重心平均(a', b')を計算する.図7において n_1 と n_2 は物体からゴールエリアに引いた接線に対する法線ベクトルであり,である.この時,選択されたエリアを C ,選択されたエリアに隣接するエリアを N_e と置き, $k_i(i=1,2,\dots,n)$ を以下のように定義する.

$$k_i = \begin{cases} 0 & (n_1 \cdot v_i > 0 \wedge n_2 \cdot v_i > 0 \wedge (x_i, y_i) \in C) \\ 1 & (\text{other}) \end{cases} \quad (7)$$

選択エリア内で速度ベクトルがゴール方向に向いていない物体の重心平均(a', b')は式(7)で定義した k_i を用いて式(8)のように表すことができる.

Fig.5 An example of the object configuration and area division in the case of the proposed collective position control method.

Fig.7 The Relationship between velocity vector and goal area

Fig.6 A flowchart for the proposed collective position control

$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k_i} \sum_{i=1}^n k_i \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、物体集団全体をゴールへ移動させるためには集団内の物体全てにゴール方向への力を加える必要がある。しかしながら、集団の重心平均座標 (a', b') を標的としてエアジェットを噴出するとゴールに対して逆方向の空気の流れが生じ、ゴールからの距離が座標 (a', b') より遠い物体にはゴール方向とは逆向きの力が加わってしまい可能性が懸念される(村井 他, 1975)(藤本 他, 1987)。そこで、式(9)により重心平均座標 (a', b') に対してゴールから β mm離れた座標 (a, b) を求める。

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} + \frac{\beta}{\sqrt{(x-a')^2 + (y-b')^2}} \begin{pmatrix} a' - x_G \\ b' - y_G \end{pmatrix} \quad (9)$$

上式で求めた座標 (a, b) を標的座標とすることで物体集団全体を後ろから押し出し、全ての物体に対してゴール方向に力が加わることが期待できる。集団移動では選択エリアに隣接する2本のエアジェットノズルのみを用いており、残りの2本のエアジェットノズルは次に述べる集団合流で用いる。

(b) 集団合流

集団合流では選択エリア外の物体 $((x_i, y_i) \in N_e)$ に対して選択エリア方向の風力を与えることで物体を選択エリアに押し戻す動作を実行する。この動作は集団移動と並列実行され、用いるノズルは集団移動で使用していないものとなる(図5の例においてはノズル2またはノズル1を使用する)。

(c) 微調整

ゴールエリアの半径 r_G からさらに r_A だけ径を広げた際に形成されるドーナツ状領域を調整エリアと定義し、以下の条件式(10)により調整エリア内物体を決定する。

$$r_G^2 < (x_i - x_G)^2 + (y_i - y_G)^2 \leq (r_G + r_A)^2 \quad (10)$$

この物体の重心座標を標的座標 (a, b) としてゴール方向への個別制御を行うことで、物体をゴールエリア内へと移動させる。そして、3・1-(a)と同様に物体停止を行う。

各ノズルの噴出角度と風力は標的座標 (a, b) を用いて個別制御の時と同様に後に述べる3・3の制御演算で決定する。上記の動作を図6の順序で実行させることによって物体を集団でゴール付近へと移動させ、ゴール付近から確実に物体をゴールエリア内で停止させることが期待できる。

3・3 噴出角度と噴出量の決定

ここでは、文献(松下 他, 2014)での知見を基にして、物体に加わる風力を近似的に集中定数系として扱えると仮定し設計を進める。各ノズルからの風力 f_k は大きさ f_k 、向き a_k であるため、

$$f_k = G_k f_k a_k \quad (11)$$

となる。ここで、 G_k は物体とノズルが離れる程、物体に加わる力が小さくなる影響を考慮するために導入された距離の関数パラメータである。このパラメータは次の章において、風力測定実験に基づく実験式の逆関数として定式化される。これより各ノズルにより噴出される風力より標的座標 (a, b) に加わる合力ベクトル $(f_x, f_y)^T$ は式(11)より、

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^4 a_k f_k \quad (12)$$

となる。以上より、本手法のキネマティクスを行列形式で表現すると以下となる。

$$f_p = K_w f_w \quad (13)$$

ただし $\mathbf{f}_p$, $\mathbf{f}_w$, $\mathbf{K}_w$ は以下のように定義する.

$$\mathbf{f}_p = (f_x, f_y)^T \quad (14)$$

$$\mathbf{f}_w = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_w = \begin{pmatrix} \sin \theta_1 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_3 & -\cos \theta_4 \\ -\cos \theta_1 & \sin \theta_2 & \cos \theta_3 & -\sin \theta_4 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここで, $\mathbf{K}_w$ はノズルの位置と姿勢により決まり, force closure 条件を満たす必要がある.

ここで集団制御における物体の振る舞いは, 複数の空気噴流による相互干渉や物体同士による衝突が発生するため極めて複雑であり, 個々の物体の正確な運動方程式を表現することは困難である. しかし, 一塊の物体は1つの剛体として扱うことが可能であるという仮説を立てれば, 運動方程式は以下のように記述できる.

$$\begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} = m_o \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} \quad (17)$$

ただし, m_o は一塊の物体全体の質量, (x, y) は一塊の物体全体の重心座標である. なお, 個別制御においては, m_o は標的物体の質量, (x, y) は標的物体の重心座標を意味するものとする.

以上の仮説の下, ここでの物体操作問題は, $\mathbf{f}_w = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T \geq 0$ とノズル角度 $\theta_k (k=1,2,3,4)$ を操作量として, 位置 $(x, y)^T$ を制御する問題として定式化される. ただし, $\mathbf{f}_w \geq 0$ は各要素が非負であることを意味する. また, 式(16)において各ノズルからの空気噴出角度 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T$ は以下となる.

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \frac{a}{\lambda-b} \\ \tan^{-1} \frac{b}{\lambda+a} \\ \tan^{-1} \frac{-a}{\lambda+b} \\ \tan^{-1} \frac{-b}{\lambda-a} \end{pmatrix} \quad \left(-\frac{\pi}{4} < \theta_i < \frac{\pi}{4}\right) \quad (18)$$

式(13)において標的座標 (a, b) は計測により既知となることを前提として, $\mathbf{f}_p$ は目標値 (x_G, y_G) と標的座標 (a, b) との差 (e_x, e_y) , もしくは物体停止の際には目標速度 $(0, 0)$ として物体速度 (v_{xi}, v_{yi}) との差に PID 補償を施すことで決定される. これより, 式(13)の逆キネマティクス演算を以下のように線形計画問題 (吉川, 1995, 1996a, 1996b) として定式化する.

$$\left. \begin{array}{l} \min : z = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\ \text{sub. to} : \mathbf{f}_p = \mathbf{K}_w \mathbf{f}_w \\ f_1, f_2, f_3, f_4 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (19)$$

式(19)にシンプレックス法を用いることで全体風量の最小化が行われ, 空気噴出量が決定される.

4. 実 験

4・1 予備実験 (風力測定実験)

4・1・1 実験概要

式(16)におけるノズル物体間距離によるゲイン $G_k (k=1, \dots, 4)$ を決定するため, 図 8 の実験装置を用いて風力測定実験を行い, 距離と風力の関係を調査する. ノズル物体間距離 D をパラメータとして, 電空レギュレータへの入力電圧と物体に加わる風力 F を計測した. 今回使用した物体は直径 20mm の球, 電空レギュレータは, 入力電圧に比例した空気圧の噴流が噴出され, 0.18MPa/V の出力特性を有し, その動作可動範囲は入力電圧 0~5.0V に対し 0~0.9MPa である.

4・1・2 実験結果と考察

ノズル物体間距離別の入力電圧と物体に加わった風力の関係グラフを図9に示す。また、入力電圧1.0[V]時のノズル物体間距離と物体に加わる風力データとべき乗近似したグラフを図10に示す。以上よりノズル物体間距離 $D = 50\text{mm}$ を基準として、各ノズルと物体の距離 D_k における距離ゲイン G_k は以下のような実験式で表現できる。

$$G_k = \frac{16.3 \times 50^{-1.236}}{16.3 \times D_k^{-1.236}} = \frac{7.944 \times 10^{-3}}{D_k^{-1.236}} \quad (20)$$

4・2 分散配置時の位置制御実験

4・2・1 実験概要

$n=5$ の場合の実験システムの概観を図11に示す。図11では高さ、幅それぞれ約500mmの平面上で半径10mm、重さ約32.6gのスチール球が平面上方からの照明の光を反射させることによって輝度カメラで正確に物体を認識し、その位置を計測している。輝度カメラから見た二値化画面の一例を図12に示す。図12では目標座標を中心におよそ半径39mmの円と制御対象となるスチール球5個の重心が表示されている。また、これ以降各制御方法で用いられる値を $\lambda = 128$, $r_G = 39\text{mm}$, $\alpha = 20$, $\beta = 60\text{mm}$, $r_A = 39\text{mm}$ とする。ばらばらに分散させて配置した物体に対して個別制御と集団制御を用いて位置制御の比較実験を行った。実験内容は5個の物体をばらばらに分散させランダムに配置し、目標値(48,48)を中心とした半径39mmの円の内側に移動・静止させるものとする。試行回数は各制御方法で3回ずつ行い、実験では制御に要した時間、目標値と各物体との距離平均、移動に失敗して拘束可能範囲外に出た物体の数をそれぞれ記録した。

Fig.8 An overview of the experimental system to measure the aerodynamic force.

Fig.10 Relation between the aerodynamic force and the distance when the input voltage is 1[V].

Fig.12 An example of the captured camera image.

Fig.9 Relation between the aerodynamic force and the input voltage for the electro pneumatic regulator with distance parameter.

Fig.11 An overview of the experimental

4・2・2 実験結果と考察

分散配置実験における1回目の実験の目標値と各物体との距離平均の時間変化を図13に示す。また、各実験で物体をゴールエリア内で静止させるまでに要した時間を表1に、移動に失敗した物体の数を表2に示す。図13において個別制御では目標値と各物体との距離平均はほぼ単調減少していることがわかる。しかしながら、集団制御では目標値と各物体との距離平均は単調減少していない。さらに表1、表2より物体を目標位置に移動させるまでの時間は個別制御と集団制御の間で大きな差はないものの、集団制御では移動に失敗した物体の数が多。この理由として集団制御では物体の平均重心を基にエアノズルの噴出角度を決定しているため、ばらばらに配置された物体を安定して制御するのが困難であるためだと考えられる。以上の結果より、制御効率にほとんど差はないが制御精度が高いことから、ばらばらに分散して配置されている複数の物体の位置制御を行うには個別制御の方が良いと考えられる。

4・3 塊配置時の位置制御実験

4・3・1 実験概要

実験システムは分散配置時の実験概要と同様とし、塊として配置された物体に対し個別制御と集団制御を用いて位置制御の比較実験を行った。実験内容は5個の物体を塊で配置しおよそ170mm離れた目標値(48,48)を中心とした半径39mmの円の内側に移動・停止させるものとする。本実験では、図14の実験配置図に示す通り、目標位置は変更せず3箇所(A(48,-40),B(-14,-14),C(-40,48))の初期配置を設定し、個別制御と集団制御で各配置3回ずつ実験を行った。実験では制御に要した時間、目標値と各物体との距離平均、移動に失敗して拘束可能範囲外に出た物体の数をそれぞれ記録した。

4・3・2 実験結果と考察

個別制御時の物体の挙動の一例を図15、集団制御時の物体の挙動の一例を図16に示し、塊配置実験における配置Aの1回目の実験の目標値と各物体との距離平均の時間変化を図17に示す。図15と図16では見易さのため、物体とゴールエリアを強調している。また、各実験で物体をゴールエリア内で静止させるまでに要した時間を表3に、移動に失敗した物体の数を表4に示す。図15において集団制御では制御開始直後に目標値と各物体との距離平均が急激に減少していることがわかる。これは物体を集団的に目標値に移動させることができていないからである。しかしながら、個別制御では物体を安定して目標値まで移動させることはできているが、集団制御と比較して時間が掛かっていることがわかる。これは、集団制御では標的を物体集団として物体を集団的に移動させ

Fig.13 Time-series data of the average distance from each object to the goal in the case of the distributed configuration.

Table 2 The number of the objects failed in control in the case of the distributed configuration.

	1st	2nd	3rd
method1	0	0	0
method2	1	1	5

Table 1 Elapsed times to the goal in the case of the distributed configuration [sec]

	1st	2nd	3rd
method1	27.7	22.2	44.3
method2	24.2	24.3	×

Fig.14 Three initial configurations of objects.

ているのに比べ、個別制御では標的を単体で扱い、物体を1つずつ移動させていることが原因であると考えられる。さらに表3においても全ての配置のおよそ全て実験において個別制御に比べて集団制御の方が短時間で制御できていることから集団制御の方が制御効率が良いことがわかる。表4では制御精度を示しており、個別制御では配置Bと配置Cで1個ずつ物体の移動に失敗しており、集団制御では配置Cで2個の物体の移動に失敗している。この結果から塊で配置されている複数の物体に対する位置制御の精度は個別制御と集団制御の間にほとんど差はないものと考えられる。以上の結果より、集団制御の方が制御効率が良く、制御精度にほとんど差がないため、塊で配置されている複数の物体の位置制御を行うには集団制御の方が良いと考えられる。

5. 結 論

複数物体に対する複数の空気噴流を用いた位置制御方式について実験的に検討した。物体をばらばらに分散させて配置した場合と塊で配置させた場合において個別制御と集団制御を制御効率と制御精度の観点より比較した。実験により、ばらばらに配置された物体に対する位置制御を行う場合は個別制御を、塊で配置された物体に対する位置制御を行う場合は集団制御を用いるのが良いという、直感的に自然な結論が得られた。そのため今後は個別制御と集団制御を組み合わせた手法を提案することで、物体の分散値などによって制御手法を変更し、物体の配置に応じた制御が行えるのではないかと考えられる。また物体の駆動範囲については、空気圧とノズル径を増加させ空気の噴出量を増やすことで、より広範囲での物体操作が可能と期待できる。さらに、制御精度や高速性等の制御性能においても、本論文の結果は実用化に向け大幅な改善が必要である。その対策としては、本報告では固定値とした集団制御の値 β を物体の配置によって変更する、ノズル数を増やす、風力をパルス状に断続的に与える(杉山 他, 2012)、カメラ画像処理速度の高速化などが考えられる。

また、本研究では物体の数 n を増加する極限として物体の粒子化・粉末化さらには流体化という展開が予想される。すなわち、流体(気体さらには液体)噴流によって一塊の流体の大まかな位置を制御する手法へと発展する可能性がある点が興味深い。

Fig.15 Behavior of the objects in the case of the individual position control method.

Fig.16 Behavior of the objects in the case of the collective position control method.

Fig.17 Time-series data of the average distance from each object to the goal in the case of the concentrated configuration.

Table 3 Elapsed times to the goal in the case of the concentrated configuration [sec]

	Configuration A			Configuration B			Configuration C		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
method1	34.6	26.1	35.2	49.7	34.5	26.0	24.8	53.9	52.9
method2	12.9	12.8	16.0	25.9	34.4	15.5	25.0	16.4	17.2

Table 4 The number of the objects failed in control in the case of the concentrated configuration.

	Configuration A			Configuration B			Configuration C		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
method1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
method2	0	0	0	0	0	0	0	0	2

参考文献

- Becker, A., Sandheinrich, R. and Bretl, T., Automated manipulation of spherical objects in three dimensions using a gimbaled air jet, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009), pp.781-786.
- Biegelsen, D., Berlin, A., Cheung, P., Fromherz, M. and Goldberg, D., Air jet paper mover, in SPIE International Symposium on Micromachining and Microfabrication (2000).
- Davis, S., Gray, J. and Caldwell, G. D., An end effector based on the bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.24, No.1 (2008), pp.249-257.
- 藤本哲夫, 新美智英, 長田祐司, 自由噴流の干渉に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.53, No.486(1987), pp.400-407.
- Iwaki, S., The optimal location of electromagnets in multiple degree-of-freedom magnetically suspended actuators, ASME Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control, Vol.112 (1990), pp.690-695.
- Iwaki, S., Morimasa, H. and Kobayashi, M., Contactless manipulation of an object on a plane surface using multiple air jets, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011).
- 岩城敏, 鈴木由里子, 小林稔, 石橋聡, 2 自由度駆動機構およびバーチャルリアリティシステム, 特許 3999631 (2007).
- 松下翼, 杉山貴俊, 辻和也, 岩城敏, 谷口和弘, 小林稔, 高木健, 石井抱, 則次俊郎, 複数の空気噴流による平面上物体の非接触操作 (連続的噴流を用いた小変位操作の実験的検討), 日本機械学会論文集, Vol.80, No.817(2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0264.
- 村井一弘, 多賀正夫, 赤川浩爾, 二次元噴流の合流に関する実験的研究, 日本機械学会論文集, Vol.41, No.352(1975), pp.3554-3565.
- Reed, N. J. and Miles, J. S., High-speed conveyor junction based on an air-jet floatation technique, Mechatronics, Vol.14, No.6 (1996), pp.685-699.
- 白水浩, 磯部松二郎, 穀物吸引搬送装置, 特許 225195(2007).
- 杉山貴俊, 辻和也, 泉智洋, 岩城敏, 複数のエアジェットによる物体の位置と姿勢の非接触制御方式に関する研究 -PWM による空気噴出法-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2012), p.224.
- 山本崇生, 高木健, 石井抱, 平面上における空気噴流を用いた非接触マニピュレーション, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.27, No.1K1-07(2009).
- Yoshikawa, T., Foundations of grasping and manipulation, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.13, No.7 (1996), pp.950-957.
- 吉川恒夫, 講座 把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.7 (1995), pp.950-957.
- 吉川恒夫, 講座 把持と操りの基礎理論 2. 指先力, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1 (1996a), pp.950-957.
- 吉川恒夫, 講座 把持と操りの基礎理論 3. 制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996b), pp.505-511.

References

- Becker, A., Sandheinrich, R. and Bretl, T., Automated manipulation of spherical objects in three dimensions using a gimbaled air jet, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009), pp.781-786.
- Biegelsen, D., Berlin, A., Cheung, P., Fromherz, M. and Goldberg, D., Air jet paper mover, in SPIE International Symposium on Micromachining and Microfabrication (2000).
- Davis, S., Gray, J. and Caldwell, G. D., An end effector based on the bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.24, No.1 (2008), pp.249-257.
- Fujimoto, T., Niimi, T. and Osada, H., A study on interacting free jets, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B, Vol.53, No.486 (1987), pp.400-407 (in Japanese).
- Iwaki, S., The optimal location of electromagnets in multiple degree-of-freedom magnetically suspended actuators, ASME Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control, Vol.112 (1990), pp.690-695.
- Iwaki, S., Morimasa, H. and Kobayashi, M., Contactless manipulation of an object on a plane surface using multiple air jets, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011).
- Iwaki, S., Suzuki, Y., Kobayashi, M. and Ishibashi, H., 2 flexibility transports and virtual reality system, Patent 3999631 (2007) (in Japanese).
- Matsushita, T., Sugiyama, T., Tsuji, K., Iwaki, S., Taniguchi, K., Kobayashi, M., Takaki, T., Ishii, I. and Noritsugu, T., Contactless object manipulation using multiple air jets on planar surface(Experimental case studies for small control range with continuous air jets), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.817(2014) , DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0264.
- Murai, K., Taga, M. and Akagawa, K., An experimental study on confluence of two-dimensional jets, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.41, No.352 (1975), pp.3554-3565 (in Japanese).
- Reed, N. J. and Miles, J. S., High-speed conveyor junction based on an air-jet floatation technique, Mechatronics, Vol.14, No.6 (1996), pp.685-699.
- Shiromizu, H. and Isobe, M., Cereal grain sucking conveying apparatus, Patent 225195(2007) (in Japanese).
- Sugiyama, T., Tsuji, K., Izumi, T. and Iwaki, S., Study on non-contact control system of a position and the posture of the object with plural air jets -air spout method by PWM-, robotics mechatronics lecture (2012), p.224 (in Japanese).
- Yamamoto, T., Takaki, T. and Ishii I., Non-contact manipulation on flat plate using air jet streams, Proceedings of the Robotics Society of Japan, Vol.27, No.1K1-07(2009) (in Japanese).
- Yoshikawa, T., Foundations of grasping and manipulation, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.13, No.7 (1996), pp.950-957.
- Yoshikawa, T., Lecture basics of hold and puppet play theory 1.Passive closure and active closure, Robotics Society of Japan, Vol.13, No.7 (1995), pp.950-957 (in Japanese).
- Yoshikawa, T., Lecture basics of hold and puppet play theory 2. Finger-tip power, Robotics Society of Japan, Vol.14, No.1 (1996a), pp.950-957 (in Japanese).
- Yoshikawa, T., Lecture basics of hold and puppet play theory 3. Control, Robotics Society of Japan, Vol.14, No.4 (1996b), pp.505-511 (in Japanese).