壁面への吸着静止維持可能な クアッドコプタ型飛翔ロボットの開発*

池田 隼悟** 小田 哲也*** 堀内 敏行†

Development of a Quad-Copter Type Hovering Robot Stickable Stably to a Wall for a Long Time

Shungo IKEDA, Tetsuya ODA and Toshiyuki HORIUCHI

In recent years, various kinds of small flying or hovering robots have been developed at various research institutions. The robots are expected to be used for observing the places where humans cannot enter, and any security cameras are not placed. However, it is difficult to keep robots hovering in the air for a long time because power loads of motors are heavy and battery capacities are limited. For this reason, a hovering robot stickable to a wall over 24 hours without supplying powers to main rotors was investigated here. By developing a new sucker with a soft surface ring of thermoplastic styrene elastomer and new mechanisms for dealing with pitching and yawing, a robot surely stickable to a wall was successfully fabricated.

Key words: hovering robot, quad-copter, saving energy, sucker

1. 結 言

近年、空撮による災害現場の調査や危険な屋内空間の状況観察等を目的として、様々な飛ぶロボットの利用や研究開発が行われており、テールロータ式や同軸二重反転ロータ式、クアドロータを初めとしたマルチロータ式がある^{1)~6)}。しかし、現場の観察や監視を行うためロボットをロータの回転により空中で長時間静止維持しようとする、モータやバッテリーに大きな負担がかかる。一般的なクアドコプタの飛行可能時間は、長くとも10~15分間程度である⁷⁾。そこで筆者らは、壁面へ吸着することでロータの回転を止めても24時間以上その場で静止維持でき、また壁面からの離脱も可能な飛ぶロボットを開発中である。他研究において吸盤を用いて壁面や室内のドアへ吸着させる試みがなされているが⁸⁾、真空ポンプ等によって吸着させているためさらなるバッテリーの消費や重量の増加が避けられない。ここでは、電源や複雑な機構を使用せずに壁面への吸着を行えるよう、受動吸盤を用いる方式の検討を行った。部屋の内壁として一般的に用いられている、表面に±30~50μmの凹凸が施された壁面にも対応できる吸盤を開発し、まずは吸着を確実にできるようにすることを目指した。当初、同軸反転型の2ロータを有する飛翔ロボットを用いて検討していたが⁹⁾¹⁰⁾、ロータ等の部品調達が困難となり、方式の変更を余儀なくされた。同軸二重反転ロータ式はテールロータ式に比べて小型だが、推進や方位転換用に補助翼などロータの回転制御とは別に独立した機構¹¹⁾が必要であった。一方、4ロータを正方配置したクアドコプタはロータの回転制御のみでロール・ピッチ・ヨー方向を制御でき、テールロータ式と比べても優位性がある¹²⁾。また、玩具や操縦競技用に普及してきたため部品の入手も容易であり、ユーザが自由に組み合わせて製作できるようになってきた。そこで、本研究で用いる飛翔ロボットもクアドコプタ型に変更し、またこれにより本研究における壁面吸着の要素技術を他のクアドコプタに移植することも可能になると考えた。

Fig.1 Schematic figure of sticking to walls

2. 壁面への吸着静止維持

2.1 受動吸盤による吸着

電源を使わずにあまり重量を増加させることなく飛翔ロボットを壁面へ吸着する方法として、負圧で吸着する受動吸盤による方法を採用した。図1に吸着方法の模式図を示す。吸盤を前面に付けた飛翔ロボットを壁面へ衝突させることで吸盤内部に負圧を発生させ、吸着力を得るようにした。衝突時の衝撃や各ロータの壁面との接触を防ぐため、機体に保護フレームを装着し、吸盤はそのフレームに付けた。吸着後は全てのロータの回転を止めて、その場に静止維持させた。

2.2 壁面吸着用受動吸盤の検討

2.2.1 塩化ビニル製吸盤

本研究における実験用の壁面として、図2に示す大学の一般教室の壁面を利用した。表面はペンキで塗装され凹凸が見受けられ、粘土に転写して得られた凹凸の高低差を測定したところ、およそ60μmであった。

壁面吸着用の受動吸盤として、初めに一般家庭でも広く用いられている図3に示す直径50mmの塩化ビニル製の吸盤を検討した。吸盤は差圧により壁面に吸着する。吸盤が押されることで吸盤内部の空気が壁面との間から外部へ押し出される。その後吸盤の縁が壁に密着したまま形状が元に戻ると、密閉空間の体積が増えて圧力が下がり、気圧と吸盤の内部圧力との間に差圧が発生し、吸着力を得る構造となっている。

しかし、図3の吸盤では図2に示すような凹凸のある壁面には吸着することができなかった。これは、吸盤の縁と壁面表面の凹凸との間に隙間が生じることで吸盤内部をシールできず、負圧を維持できないことが原因と考えた。

* 原稿受付 平成28年12月18日

掲載決定 平成29年3月15日

** 学生会員 東京電機大学大学院 (東京都足立区千住旭町5)

*** 東京電機大学工学部

† 正会員 東京電機大学大学院

Fig.2 Wall surface used for the experiments

Fig.3 Commercially available sucker made of polyvinyl chloride (PVC)

Fig.4 Schematic structure of the newly developed sucker

2.2.2 新受動吸盤の検討

そこで、図 2 の壁面にも対応できるよう新たな吸盤の考案、製作を行った。図 4 に考案した吸盤の模式図を示す。ゴム材料製の吸盤ベースの円周下部に柔らかくて弾性のあるゴム材料製の角リング（表面リング）を配置することで、粗さがある壁面にも密着し、吸盤内部の空洞をシール可能にすることを検討した。吸盤ベースの中央には、機体の保護フレームへ搭載するためのアクリルブロックを配置した。吸盤ベースの形状は、加工の容易さから円形のシート状とした。また、吸盤表面を正しく壁面へ当てるため、吸盤に剛性を持たせることが必要であると考えた。そのため吸盤ベース上にプラスチック材製の角リング材（ベースリング）を配置した。

図 5 に吸着時の形状変化の模式図を示す。(a) 内の P_0, n_0, V_0 はそれぞれ初期状態の吸盤内部の圧力、気体の物質量（モル）、体積を示す。壁面への衝突時には、壁面に対して垂直な力が生じてアクリルブロックが押し込まれ、(b) に示すように吸盤内部の空気が円錐台形の体積 ΔV 、物質量 Δn だけ外部へ押し出される。その後、表面リングによって壁面に対して吸盤内部が

Fig.5 Phase change of the sucker

シールされたままベースが元の形状に戻ろうとするので内部に負圧が発生する。この負圧と吸盤内部の面積との積が吸盤の吸着力、すなわち壁面に対して垂直な方向に関する耐荷重となる (c)。

2.3 吸着力を考慮した吸盤の設計

次に、考案した吸盤の壁面に対して垂直方向の吸着力、すなわち耐荷重の理論値を算出する式を導出し、製作する吸盤の寸法を決定した。なお、気体は理想気体で、温度 T を 298K、気体定数 R を $8.314 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L/K} \cdot \text{mol}$ 、標準モル体積を 24.8 L/mol とした。

図 5 (a) に示す初期状態から、吸盤ベース中央のアクリルブロックを押し込むと外部へ押し出された気体の分子量だけ内部の気体密度が下がり、負圧となる。

初期形状における吸盤内部は円柱形状をしているため、その体積 V_0 は、

$$V_0 = \frac{\pi t}{4} D^2 \quad (1)$$

で求まる。

図 5 (b) において円錐台形に押し出される空気の体積 ΔV は、円錐全体の体積から除去する頂部の円錐の体積を引くことにより算出できる。比例定数を k とすると、

$$h = kD \quad (2)$$

$$t' = kd \quad (3)$$

であり、

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{2} D \right)^2 h - \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{2} d \right)^2 t' \\ &= \frac{\pi k}{12} (D-d)(D^2 + Dd + d^2)\end{aligned}\quad (4)$$

となる。ここで、式 (1), (2) より、

$$k(D-d) = h - t' = t \quad (5)$$

であるので、

$$\Delta V = \frac{\pi t}{12} (D^2 + Dd + d^2) \quad (6)$$

と求めることができる。

押し出された後の気体の物質質量 n_1 は、

$$n_1 = \frac{(V_0 - \Delta V) \times 10^3}{24.8} \quad (7)$$

であり、押し込み後吸盤の吸盤内部の気体の圧力 P_1 は、理想気体の法則¹³⁾より、

$$P_1 = \frac{n_1 RT}{V_0} \quad (8)$$

となる。

吸盤の吸着力（耐荷重）は、この P_1 と大気圧 P_0 (0.1013MPa) との間の差圧と吸盤の有効面積との積により算出できるため、吸盤の吸着力 F は、

$$F = (P_0 - P_1) \times \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (9)$$

で求まる。

吸着力の目安として、アクチュエータを搭載したクアドコプタを真空ポンプにより吸着する 4 つの吸盤（直径 50mm）でドア表面に対して平行に吸着させた他研究の例¹⁴⁾を参考とした。吸盤を引っ張ったときの耐荷重は約 70N であり、クアドコプタの重量は 1700gf であったため吸盤 1 つあたり 425gf を支えることになる。本研究ではアクチュエータは搭載せず、1 つの受動吸盤で長時間姿勢を水平に保ったまま壁面に吸着させることを考えた。また、ロボットの重量は 350gf 前後に抑えることとした。したがって、上記の例に対して比例計算で求めた耐荷重は、 $70 \times 350 / 425 = 57.6$ となった。しかし、真空ポンプを使わずに吸盤 1 つで吸着させるので少し余裕を見ることとし、壁面に対して垂直方向におよそ 100N を目標値として設定して吸盤の寸法を決定することとした。式 (1) および式 (6)~(9) から分かるように、この吸盤の場合、表面リングの厚さ t の違いによって吸着力に差はない。そこでまず、吸盤内部の直径を 50mm、アクリルブロックの直径を 20mm として理論上およそ 100N の吸着力を得られる吸盤を製作することとし、表面リングの厚さと幅が違うものを幾つか用意して比較検討し、寸法を決定することとした。

2.4 新受動吸盤の製作

考案を基に新たな受動吸盤を製作した。図 6 にその外観を示す。重量は 11.9gf である。吸盤ベース材料としては、耐候性、耐久性、温度変化耐性が高く、かつクリープ変形を起こしにくいことからシリコンゴムを採用した。厚さは 1mm とした。表面リングに用いる材料としては、凹凸のある壁面にも密着できるよう硬度が低い弾性材料を検討し、硬度 0° (JIS K 6523 A) のスチレン系熱可塑性エラストマ（木原産業、Thermoplastic styrene elastomer: TPS）を採用した。なお、各部材同士は化学反応型接着剤により接合した。また、この新たな吸盤を Si-TPS 吸盤と命名した。表面リングの寸法を検討するため、厚さ 3mm×幅 3mm、厚さ 3mm×幅 5mm、厚さ 3mm×幅 10mm、厚

さ 5mm×幅 5mm の 4 種類を用意した。例として図 6 に厚さ 3mm×幅 5mm のものを示す。吸盤に剛性を持たせるためのベースリングの材料には、壁面に衝突した際の衝撃に耐えられるよう耐衝撃性に優れたポリカーボネートを採用した。

クアドコプタは前後のロータの回転数に差をつけ、図 1 (a) に示したように姿勢を傾斜させることで水平方向に推進する。そのため、吸盤を固定してしまうと衝突時に吸盤表面の上部のみが壁面に接し、吸盤内部の空気を押し出して吸着することができない。そこで、アクリルブロックにラジアルボールベアリングを取り付け、吸盤が 1 自由度で上向きに 90 度回転できるように取り付けた。ロボットが傾斜した姿勢で壁面に衝突しても、表面が壁面に平行となるよう吸盤が回転して、吸着できるようにした。

2.5 耐荷重測定による表面リング寸法の決定

次に、製作した 4 種類の Si-TPS 吸盤の耐荷重をデジタルフォースゲージ（イマダ、DS2-500N）により測定した。アクリルブロックに括り付けたクリップをフォースゲージで引っ張り、吸盤が壁面から剥離した時点か表面リングが吸盤ベースから剥離した時点、もしくは吸盤ベースが破れた時点での力を最大の耐荷重と定義し、壁面に垂直な方向と剪断方向に各 5 回ずつ測定した。図 7 に測定状況を示す。垂直方向 (a) は、XY テーブル上に固定したフォースゲージを X 方向に移動させて測定し、剪断方向 (b) はフォースゲージを真下へ引っ張って測定した。比較のため直径 50mm の塩化ビニル製吸盤についても測定したが吸着できず、垂直方向と剪断方向ともに 0N であった。

まず、幅 a を 5mm とし厚さ t の違い (3mm, 5mm) による比較を行った。測定結果を図 8 に示す。

Fig.6 Outlook of the newly developed sucker (Si-TPS sucker)

Fig.7 Measuring method of suction force

Fig.8 Suction force dependence on surface ring thickness

Fig.9 Suction force dependence on surface ring width

Fig.10 Measurement of allowable moment

Fig.11 Measured allowable moment

測定結果から、Si-TPS 吸盤の有効性を確認することができ、耐荷重は厚さ 3mm のときの方が大きかったため、まず厚さを 3mm とすることとした。垂直方向に関して理論値よりも大きな値が測定されたが、これはフォースゲージで吸盤を引っ張ったとき、吸盤ベースが伸びて吸盤内部の体積が増加した分吸盤内部の圧力が余分に低下したことによるものと考えられる。厚さを 5mm にすると剪断方向に力を加えた際、20N を越えた辺りで毎回表面リングが吸盤ベースから剥がれてしまった。

次に、厚さ t を 3mm として幅 a の違い (3mm, 5mm, 10mm) による比較を行った。図 9 に測定結果を示す。

測定結果から、幅 3mm に比べて幅 5mm と幅 10mm の方が耐荷重は大きかった。幅 5mm と 10mm ではあまり差が見られなかったため、より小さく軽量で済むよう幅は 5mm とすることとした。幅 3mm のせん断方向を測定した際、他と比べて小さい荷重で表面リングが吸盤ベースから剥がれてしまった。

以上の結果から、表面リングは厚さ 3mm、幅 5mm とした。

2.6 許容モーメントの測定

上記の剪断方向の耐荷重測定の際、実際には壁面から 15.8mm の位置に下向きの荷重をかけており、吸盤にはモーメントが同時にかかっている。測定した剪断方向の耐荷重の平均値は 61.4N であったため、その値は $61.4 \times 0.0158 \approx 0.97$ となり、製作した Si-TPS 吸盤の許容モーメントは 0.97Nm であると考えた。しかし、壁面から近い位置での値であり誤差も考えられたため、壁面からの距離を遠くした位置でも測定を行った。

図 10 に測定方法を示す。吸盤ベース上の中央に直径 20mm 厚さ 2mm のアクリル製丸板を取り付け、その上に一定間隔で穴が開いたステンレス製の薄板を垂直に取り付けた。その後、吸盤を壁面に吸着させて薄板上の穴にフォースゲージのフックを引っ掛けて鉛直下向きに引っ張り、得られた耐荷重と壁面からフックまでの距離の積を許容モーメントとして測定した。図 11 に測定結果を示す。

後述するように、ロボットの縦の寸法は 254mm であり、重心がロボットの中央にあるとすると、吸盤表面から重心までの距離は 127mm である。その位置に自重 350gf がかかるとするとモーメントは、 $0.35 \times 9.81 \times 0.127 \approx 0.44$ であるため、実験結果と比較するとモーメントの観点からも吸盤の性能は十分であると判断した。

2.7 吸盤押込みに必要な力の測定

次に、Si-TPS 吸盤を押込むために必要な力をデジタルフォースゲージ (エー・アンド・ディー, AD-4932A) により測定した。図 12 に測定方法を示す。フォースゲージを下向きに固定し、Z 軸ステージ (駿河精機, B33-60A) 上に置いた Si-TPS 吸盤をアクリルブロックがフォースゲージの計測軸に触れるようフォースゲージの直下に設置した。その後、Z 軸ステージを 0.1mm ずつ、表面リングの厚さである 3mm まで上昇させて吸盤を押込み、荷重を測定した。図 13 に測定結果を示す。測定の結果、最大 1.35N という弱い力で押込めることが分かった。最大押込み量は表面リングの厚さである 3mm に達せず 2.4mm であった。これは、アクリルブロックの重みでわずかに吸盤ベースが撓んだことや、押込んだ際に表面リングが徐々に圧縮されていったことによるものと考えられる。

Fig.12 Measurement of load required to push the Si-TPS sucker

Fig.13 Load required to push the Si-TPS sucker

Fig.14 Quad-copter type hovering robot with the Si-TPS sucker

3. クアドコプタ型飛翔ロボットの製作

3.1 外観と諸元

市販のクアドコプタ (Diatone innovations, Diatone Blade 180) をベースとして、保護フレーム及び Si-TPS 吸盤を搭載した飛翔ロボットを製作した。図 14 に外観を示す。寸法は縦 254mm, 横 302mm, 高さ 130mm, ロータ径 104mm であり、重量は 321gf である。機体の周囲を幅 15mm, 厚さ 2mm の保護フレームで囲った。壁面に繰り返し衝突させるため、万が一衝突時の衝撃で破損しても破片がモータ等をショートさせない非導電性のプラスチック材料であり、かつ耐衝撃性に優れるポリカーボネートで保護フレームを製作した。電源には Li-Po バッテリー (7.4V, 800mAh) を使用し、プロポ (双葉電子工業, T10J) によりマニュアルで操縦可能である。鉛直方向をヨー軸、壁面に対して水平方向と垂直方向をそれぞれピッチ軸、ロール軸とした。

3.2 突入速度に非依存で吸着可能な構造

壁面へ衝突することで吸盤を押込んで、吸着力を得ることを見込んで設計した。しかし、突入時に速度を十分確保できず吸盤の押込みが不十分となり、吸着を行えない状況も想定された。そのため、突入速度に依存しない吸着を可能にする

Fig.15 Structure for sucking sufficiently without depending on the dash speed

構造とした。

吸盤を押込んでいない場合であっても、吸盤表面が壁面に接触した状態でロータの回転数を上げれば、吸盤上のラジアルボールベアリング回りに機体がピッチ回転して上昇し吸盤を押込む構造とした。図 15 にその状態を示す。図はロボットを真横から見た状態を示し、図中の F_L , φ はそれぞれロータの回転により発生する揚力 (単位: N) とピッチ角を示す。揚力により機体をピッチ回転上昇させると、壁面に対して垂直な成分 $F_L \sin \varphi$ と、鉛直方向の成分 $F_L \cos \varphi$ に F_L を分解できるが、この $F_L \sin \varphi$ により吸盤を押込める。この力を F_p とする。しかし、壁面の状態によっては吸盤を押込んでも吸着力を得られない状況も考えられ、そのまま回転上昇を続けると機体が滑り落ちてしまう。そこで、保護フレームを三角形状に上部へ伸ばし、回転上昇を続けると保護フレームが壁面と接触して過剰な回転上昇を抑え、滑落を防ぐ構造とした。設計上は最大 30deg まで対応可能にした。

$F_L \cos \varphi$ を機体の重量 321gf (約 3.15N) よりも大きくすれば機体をラジアルボールベアリング回りにピッチ回転上昇させることができた。

$$F_L \cos \varphi > 3.15 \quad (10)$$

がピッチ回転上昇の条件となる。

(5) 式より、揚力は

$$F_L > \frac{3.15}{\cos \varphi} \quad (11)$$

で表すことができるため、吸盤を押込む力 F_p は、

$$F_p = F_L \sin \varphi = 3.15 \tan \varphi \quad (12)$$

よりも大きな値となる。

吸盤を押込むために必要な力は図 13 より 1.35N 以上であるため、式 (12) の F_p を 1.35N 以上とする必要がある。

したがって、

$$\varphi \geq \tan^{-1} \frac{1.35}{3.15} \approx 23.2 \quad (13)$$

のピッチ角で回転上昇させれば押込むことができ、最大で 30deg となるよう設計した。機体を回転上昇させることで、吸盤表面が壁面と接触してさえすれば突入速度に依存せず吸盤を押込むことが理論上は可能となる。

3.3 突入時のヨー角に対応可能な構造

壁面吸着の際、吸盤表面が壁面に対し平行となるように、機体を壁面に対して垂直に突入させることが好ましい。しかし、操縦によるずれや外乱の影響によりヨー角がついた突入となることが考えられる。そこで、ヨー角がついた突入にも対応できるロバスト性を持った保護フレームとした。

Fig.16 Countermeasure for the dash with yaw angle

Table 1 Sticking time when the sucker was manually contacted to the wall

Test number	Sticking time h
1	> 24
2	> 26
3	> 24
4	> 25
5	> 25

図 16 にヨー角がついた突入の状態を示す。図中の θ と φ はそれぞれヨー角とピッチ角を示す。ヨー角がついた状態で突入すると、保護フレームが先に壁面と接触する。この接触部分を軸として、壁面に対し垂直な揚力成分 $F_L \sin \varphi$ によりヨー角を徐々に減らしながら機体が水平面内で回転し、最終的に吸盤表面が壁面と平行となり吸着が可能となる構造とした。設計上、55deg まで対応可能とした。

4. 壁面吸着実験

4.1 手動押込みによる吸着実験

製作したクアドコプタ型飛翔ロボットを用いて壁面への吸着実験を行い、目標である 24 時間の吸着を行えるかどうか検討した。

初めに、フライトさせずに手で機体を壁面へ押し当てて吸着させ、吸着時間を測定した。吸着時間は機体を壁面に吸着させてから脱落するまでを吸着時間とし、図 2 に示した壁面を実験に用いた。5 回実験を行った結果を表 1 に示す。全ての回において目標の 24 時間以上吸着できた。この結果から、製作した機体は吸盤をきちんと押込むことができれば、図 2 に示すような粗さのある壁面に 24 時間以上吸着させることができることが分かった。

4.2 機体の回転上昇による吸着実験

次に、突入速度に依存しない吸着構造であることを実証するため、機体の回転上昇による吸着実験を行った。図 17 に側面から見た実験の様子を示す。

Si-TPS 吸盤を押込まずに吸盤表面が壁面と接触した状態で台座上に機体を設置し、ロータの回転数を上げて揚力を発生させ、ピッチ角が 23.2deg 以上になるようベアリング回りに機体を回転上昇させた。その後台座を取り払ってロータの回転を止め、機体が静止状態に移移したことを確認してから吸着時間を測定した。5 回実験を行った結果、表 2 に示すように各回とも 24 時間以上の吸着時間が得られた。このことから、突入速度に依存せず壁面に吸着できると予想した。

Fig.17 Side view when the sucker surface softly contacts the wall

Table 2 Sticking time when the sucker was pushed by rotating rotors

Test number	Sticking time h
1	> 24
2	> 26
3	> 24
4	> 25
5	> 24

Table 3 Sticking performance when the robot was dashed against the wall by various pitch angles

Test number	Pitch angle deg	Success or failure
1	5.7	○
2	11.4	○
3	19.5	○
4	13.9	○
5	16.4	○
6	14.2	○
7	7.0	○
8	24.8	○
9	13.5	○
10	17.3	○
11	6.4	○
12	3.2	○
13	24.1	○
14	5.2	○
15	11.6	○

4.3 フライトによる壁面吸着実験

4.3.1 垂直突入による吸着実験

次に、プロポを用いたマニュアル操縦により機体をフライトさせ、壁面への吸着実験を行った。初めに、ヨー角 0deg の推進、すなわちピッチ角のみ傾斜させた壁面への吸着実験を行った。その際、突入時のピッチ角を測定した。壁面の側面からカメラで撮影した衝突直前の画像を 2 次元 CAD の画面上へ貼り付け、保護フレーム側面に直線を引いてピッチ角を測定した。また、衝突後、機体の回転上昇による吸着動作を行えるかどうか確認した。15 回実験を行った結果を表 3 に示す。15 回すべてについて、壁面に衝突後、回転上昇による吸着動作を行えることを確認した。

4.3.2 ヨー角をつけた突入による吸着実験

次に、ヨー角をつけた突入実験を行った。衝突後、機体のピッチ回転上昇による吸着動作を行えるのかも確認した。壁面の上面から突入の様子を撮影し、衝突直前の画像を 2 次元 CAD 上に貼り付け、図 18 に示すように保護フレームと壁面に直線を引いて 2 線間の角度を突入ヨー角として測定した。

壁面から見て反時計回りを正、時計回りを負とした。

正負ともに 15 回ずつ計 30 回実験を行った結果、表 4 に示すように正負それぞれ 40.3deg と -41.4deg まですべて吸盤表面が壁面に接触し、ピッチ回転上昇による吸着動作がうまく行えた。図 19 に、(a) 飛翔して (b) 壁面に衝突し、(c) ピッチ回転上昇により吸着した後、(d) ロータを止めて静止吸着状態に移行した様子を示す。吸着時間は教室の利用時間の関係上、各回 1 時間までしか確認しなかったが、別途フライトによって吸着させて長時間放置した結果、26 時間以上の吸着を確認できたため、同様に吸着できると考えている。また、吸盤の個体差を確認するため同じ寸法で Si-TPS 吸盤を作り直してロボットに

Fig.18 An image of the robot front just before sticking to the wall

Table 4 Sticking performance when the robot was dashed to the wall by various yaw angles

(a) Positive direction		
Test number	Yaw angle deg	Success or failure
1	30.5	○
2	27.3	○
3	17.5	○
4	4.8	○
5	27.3	○
6	20.3	○
7	34.1	○
8	19.0	○
9	24.6	○
10	19.7	○
11	24.3	○
12	32.2	○
13	30.6	○
14	40.3	○
15	18.8	○

(b) Negative direction		
Test number	Yaw angle deg	Success or failure
1	-6.4	○
2	-2.5	○
3	-15.7	○
4	-18.9	○
5	-25.4	○
6	-18.6	○
7	-32.8	○
8	-28.7	○
9	-38.1	○
10	-32.4	○
11	-39.1	○
12	-18.8	○
13	-41.4	○
14	-39.8	○
15	-36.6	○

搭載し再度実験を行った結果、48 時間以上の吸着を確認できた。このことから、同じ寸法、形状で吸盤を作れば同様の性能が得られると考える。

(a) Hovering

(b) Moment of collision

(c) After pushing the sucker by pitch rotation

(d) After stopping the rotor rotation

Fig.19 Images of the robot sticking to the wall

5. 結 言

本研究では、新たに考案した吸盤を市販のクアッドコプタを改良した飛翔ロボットに付け、一般的な室内壁面への吸着静止維持について検討した。壁面への突入速度に依存せず、かつヨー角が付いた突入でも吸着を行えるように設計し、実験を行って機能を実証した。

- (1) 手で吸着させて放置すれば 24 時間以上吸着を保持できることを 5 回確認した。
- (2) 台座上に機体を接置して吸盤表面が壁面と接触した状態からロータを回転させて吸着させても 24 時間以上吸着を保持できることを 5 回確認した。

- (3) 様々な速度で突入時のピッチ角が 3.2~24.8deg に変化しても、ヨー角が-41.4~40.3deg に変化しても吸着でき、少なくとも 1 時間以上吸着を保持できることを計 35 回確認した。
- (4) フライトによって吸着させても 24~48 時間吸着を保持できることを 2 回確認した。
- 今後、壁面からの離脱方法や対応できる壁面の種類の拡大について検討していく。

参 考 文 献

- 1) 三輪昌史：電動無人ヘリコプタの発展について，第 57 回自動制御連合講演会，(2014) 2A06-3.
- 2) Y. Kobayashi, K. Kanamori, Y. Imai, R. Eda and T. Horiuchi: Development of a Small Hovering Robot with High Lifting Force Using Coaxial Double Rotors Driven by Twin Motor Pairs, Key Engineering Materials, (2012) 705.
- 3) DJI Phantom4: <http://www.dji.com/jp/product/phantom-4>, 2016.12.2 アクセス.
- 4) 森田康介，越後富夫：クアドコプタの自律飛行における自動マーカー追跡，電子情報通信学会総合大会，(2014) D-12-67.
- 5) 岩倉大輔，野波健蔵，藤原大悟：赤外線距離センサを搭載した飛行ロボットの屋内事故位置推定，日本機械学会「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集，(2011) 253.
- 6) 滝田好宏，大川真弥，伊達 央：一モータ駆動同軸二重反転機構を用いた Trirotor 型ヘリコプタによるホバリング，日本機械学会論文集，**80**，(2014) No 812.
- 7) 井上 公，内山庄一郎，鈴木比奈子：自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術，防災科学技術研究所研究報告，**81** (2014) 61.
- 8) H. Tsukgoshi et al. : Aerial Manipulator with Perching and Door-opening Capability, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2015) 4663.
- 9) 池田 隼悟，小田哲也，堀内敏行：小型飛翔ロボットの壁面への吸着静止維持，精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集，(2015) 79.
- 10) S. Ikeda, T. Oda and T. Horiuchi: Development of a Small Hovering Robot Sticking to a Wall Using a Sucker, Proceedings of 16th International Conference on Precision Engineering, (2016) P22-8092.
- 11) 長嶋 康太郎，堀内 敏行：取付角を制御できる補助翼を用いた二重反転飛翔機構ロボットの操縦容易化，2006 年度精密工学会秋季大会 学術講演会論文集，(2006) 463.
- 12) 宮下亮，砂田茂，田辺安忠，青山剛史：シングルロータヘリコプタとクワッドロータ機の比較，日本航空宇宙学会論文，**62**，6，(2014) 193.
- 13) J. McMURRY, R. C. FAY 著，荻野博，山本学，大野公一 訳：マクマリー 一般化学（上），株式会社東京化学同人，(2010) 193.
- 14) 渡辺将広，飯塚隆真，塚越秀行：マニピュレーション機能を有する飛行ロボットー第 4 報：壁面への吸着方法ー，Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, (2014) 2A-B03.