

加速度指令による船内フリーフライヤーの遠隔操作

横浜真誠, 妻木勇一 (弘前大学)

Teleoperation of an Intra-Vehicular Free-Flyer Using Acceleration Commands

*Mami YOKOHAMA, Yuichi TSUMAKI (Hirosaki University)

Abstract— In our previous work, a new space robot system named IVFF (Intra-Vehicular Free-Flyer) has been introduced to support intra-vehicular activities in the space station. It utilizes a propeller propulsion to fly in the station. However, its dynamics reduces the ability of teleoperation. In this paper, we propose a new predictive display technique to overcome the problem. The experimental results shows that our method decreases task completion time and enhances safety.

Key Words: IVFF, SHB, Predictive display, Acceleration command, International space station

1 序論

現在, 国際宇宙ステーションの建設が進められており, 様々な宇宙実験が予定されている. しかし, 国際宇宙ステーションにおける宇宙飛行士の滞在人数には限りがあるため, 軌道上での人員不足が懸念されている. そのため, 宇宙飛行士の船内活動を支援するロボットの研究が進められている. NASA では, PSA(Personal Satellite Assistant) と呼ばれる船内用小型フリーフライングロボットの研究が行われている [1]. PSA は情報の収集や発信といった非接触作業のみを対象とした船内活動支援を目的としている. しかし, 非接触作業のみでは十分に船内活動をサポートすることができない. そこで我々は, 非接触作業だけでなく接触作業を含む支援も可能なロボットシステムとして船内用フリーフライヤーシステム (Intra-Vehicular Free-Flyer System, IVFFS) を提案してきた [2], [3]. Fig. 1 に IVFFS の概念図を示す. さらに, 我々は IVFFS のひとつの形態として SHB(Space Humming Bird) と呼ぶフリーフライヤーを提案してきた.

SHB は地上からの遠隔操作により, 船内活動を支援する. しかし, SHB を地上から遠隔操作する場合, 通信時間遅れにより作業効率が低下する. この問題を解決するためには, 3次元グラフィクスシミュレータ等を用いた予測表示が有効と考えられる. 一方, SHB は船内が与圧されていることを利用して, 推進システムとしてプロペラ推進の利用を前提としている. しかし, プロペラ推進は大きな推力を得ることが難しいので, 機体の動きはダイナミクスの影響を受け, 即応性のある動きは期待できない. すなわち, 操作者が遠隔操作により直接 SHB を操作する場合, 加速度指令を機体を与えて操作を行うことになる. このため, 操作者は慣性の影響を考慮しながら操作しなくてはならず, 操作効率が著しく劣化する.

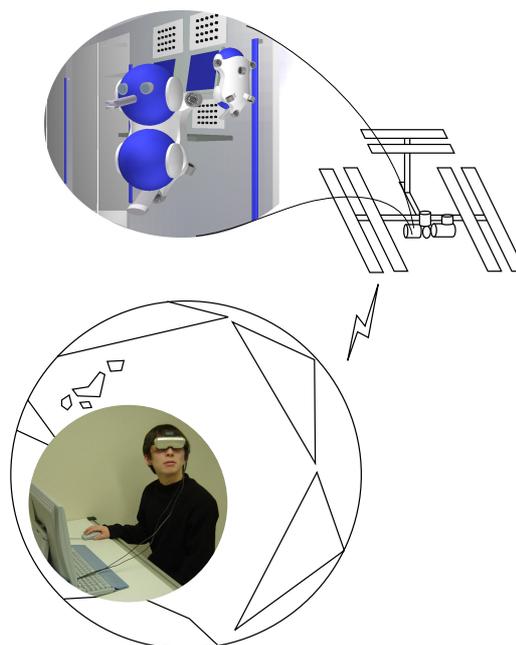


Fig. 1: Concept of the IVFFS.

そこで, 本論文ではこのような問題に対処するため, ロボット本体の予測位置を表示するオペレータ支援を提案する. なお, 提案する予測位置表示は通信時間遅れがある場合の予測表示とは異なる. すなわち, 通信時間遅れが無い状態を提示するのではなく, 未来の予想されるロボットの位置を提示するものである. したがって, 本論文では通信時間遅れが無い状態で有効なオペレータ支援システムについて論ずる. 7名の被験者に対し, 実験を行い, 提案する手法の有効性を検証した.

2 SHB と問題点

現在船内活動支援用ロボットとして検討中である SHB の概観を Fig. 2 に示す. また, SHB の特徴を以下に示す.

- 自由飛行型ロボット

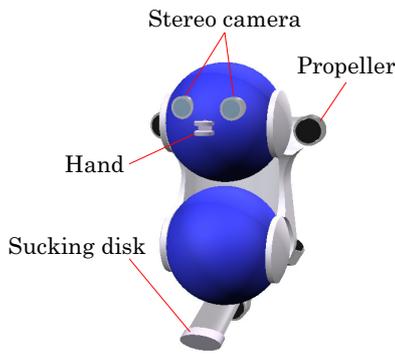


Fig. 2: Overview of the SHB.

- プロペラを用いた推進システムの利用
- 地上からの遠隔操作による運用
- 吸盤を用いた壁への固定
- 全身を用いたマニピュレーション機能

SHBの特徴は、全身を用いたマニピュレーション機能により、接触作業を実現できることであるが、もう一つの特徴として、船内の空気を利用したプロペラ推進の利用がある。これにより電気エネルギーだけで自由飛行が可能となる。しかし、プロペラ推進に大きな推力は期待できないのでロボットの動きは慣性の影響を大きく受けることになる。また、実際には、プロペラの反力の影響も無視できないが、問題が複雑化するので本論文ではプロペラの反力の影響は扱わない。なお、直接推力(加速度)を操作指令として与えるよりは、自律機能を持たせることにより、より高度な指令(例えば目標位置)を与えるほうがシステムとしては望ましい。しかし、これを実現するためには、正確な自己位置同定法を確立しなければならない。また、自律機能だけでは対応できない状況も起こりえる。そこで、本論文では、より低レベルな指令である加速度指令を直接操作者が与える場合を取り扱う。この場合、ロボットは慣性の影響を大きく受け、操作性が著しく劣化する。例えば、目標位置に静止させることも、目標位置で速度が零になるようタイミング良く指令を与えなければならないと困難となる。

3 予測位置表示

上述の問題を解決するために、予測位置表示を提案する。提案する予測位置表示は、従来の通信時間遅れに対処するために用いられる予測表示とは異なる。従来の予測表示は、通信時間遅れがないと仮定した時のロボットの状態を示したものであるが、提案する方法は、予測されるロボットの未来の位置を提示する方法である。すなわち、通信時間遅れが発生していない状態でのオペレータ支援システムである。

具体的には、動作しているロボットが現在速度 v_{cur} で等速運動していると仮定し、 t_{pre} 秒後のロボットの予測位置 p_{pd} を提示する。ロボットの現在地を p_{cur} とすれば p_{pd} は以下のように表される。

$$p_{pd} = p_{cur} + v_{cur}t_{pre} \quad (1)$$

この予測位置表示のもつ特徴を以下に示す。

- 予測位置表示はロボットの現在位置 p_{cur} に対して現在速度 v_{cur} で等速運動したと仮定した時の予測位置を提示するため、操作する実際のロボットに比べて立ち上がりが速い。
- ロボットを目標位置に停止させる場合、予測位置表示が目標位置に達しても、ロボットが速度を持っているため、予測位置表示は、さらに先に進むとする。そのため操作者は予測位置表示に対して目標位置に留まる逆向きの指令を与え続ける必要がある。
- ロボットに対する予測位置表示までの位置と方向は、ロボットの現在の速度ベクトルに等価であるため、結果的にロボットと予測位置表示が一致し、距離が0となった時、ロボットの現在速度 v_{cur} が0となる。
- 予測位置表示を用いた操作は、操作者が速度ベクトルを意識した操作でもあるため、加速度指令でありながら速度制御に近い感覚で操作することが可能である。

4 加速度指令によるシミュレーション実験

提案する予測位置表示の効果を検証するため、コンピュータグラフィックスによるシミュレーション実験を行った。

4.1 実験システム

Fig. 3 に実験システムの概要を示す。シミュレータは Red Hat Linux 9 上に、OpenInventor を用いて構築した。SHB を動かすインタフェースとして6軸力覚センサ IFS (Intelligent Force Sensor: ニッタ株式会社) を用いたジョイスティックを使用した。力覚センサを用いているため、操作者が加える力を直接測定することが出来る。

4.2 加速度指令

SHB に与える加速度指令は、操作者がジョイスティックに加える力に比例するようにした。具体的には、次式のように SHB の推進力 F を操作者が加えた力 f に

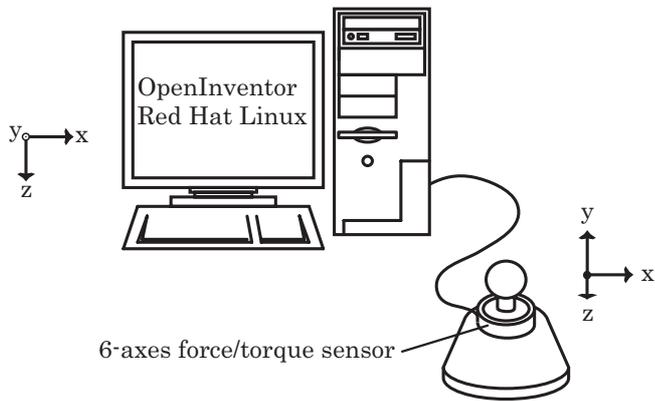


Fig. 3: A system of the CG simulator.

適当なゲイン k をかけて求め、そこから、加速度を算出した。

$$F = kf \quad (2)$$

実験では、 $k = \text{diag}[0.03, 0.03, 0.03, 0.025, 0.025, 0.025]$ とし、SHB の質量を 1 kg と定めた。

4.3 操作実験

複数の被験者を用いて、予測位置表示を利用した加速度指令の操作実験を行い、その有効性を検証する。実験のために、2次元平面のシミュレータを構築した。構築したシミュレータの座標系を Fig. 3 に示す。シミュレータの環境として仮想の壁に囲まれた縦 1 m、横 2 m の台を想定した。シミュレータ内の SHB は並進 2 自由度、回転 1 自由度の計 3 自由度を持ち、加速度指令により操作される。実験に使用したシミュレータ環境を Fig. 4 に示す。シミュレータ内では、SHB に生じる摩擦は無いものとする。また、今回は予測位置表示の有効性を検証する実験であるため、被験者が操作し易いよう SHB が壁にぶつかった場合は跳ね返るように設定した。反発係数を 0.5 としている。

4.4 実験条件

7 名の被験者が加速度指令により SHB を操作する。実験に用いるシミュレータ内にはスタート位置とゴール位置が提示してあり、スタートからゴールまでの間には 4 つの障害物が置かれている。被験者にはそれらの障害物に出来るだけ接触しないように SHB を操作するよう指令を与える。スタート地点から出発し、ゴール位置にある決められた枠内に SHB の方向を合わせ、SHB を停止させることでゴールとなる。ゴールの基準は、ゴール座標より並進に関しては縦横それぞれに ± 30 mm 以内、回転に関しては $\pm 10^\circ$ 以内の範囲に収まることとし、並進速度は ± 10 mm/s 以内、回転角速度は ± 0.1 rad/s 以内の範囲内に収まったときゴール

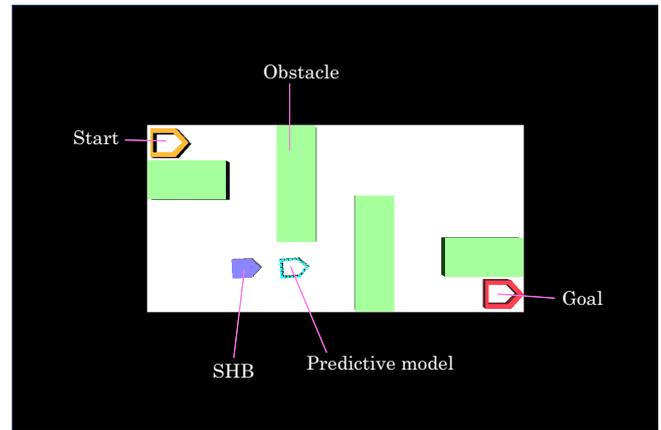


Fig. 4: Overview of the simulator.

したと見なした。このシミュレータを用いて、 $t_{pre} = 0, 1, 2, 3$ s の条件下で操作実験を行った。

実験する前に、被験者に 3 分間の操作練習を行わせ、その後、3 回の操作実験を行う。この操作を $t_{pre} = 0, 1, 2, 3$ s と変えて行い、計 12 回の操作実験を行った。また、操作の「慣れ」の検証を行うため、計 12 回の実験後、 $t_{pre} = 0$ s の条件下（予測位置表示ナシ）で 3 回の操作実験を行った。このとき 3 分間の操作練習は行っていない。実験の流れを以下に示す。

- 1 予測位置表示ナシ ($t_{pre} = 0$) … 操作練習 (3 分)
操作実験 (3 回)
- 2 予測位置表示アリ ($t_{pre} = 1$) … 操作練習 (3 分)
操作実験 (3 回)
- 3 予測位置表示アリ ($t_{pre} = 2$) … 操作練習 (3 分)
操作実験 (3 回)
- 4 予測位置表示アリ ($t_{pre} = 3$) … 操作練習 (3 分)
操作実験 (3 回)
- 5 予測位置表示ナシ ($t_{pre} = 0$) … 操作実験 (3 回)

以上の実験を行い、ゴールするまでの操作時間、壁との衝突回数およびスタートからゴールまでの SHB の軌跡を測定した。

4.5 実験結果

実験により得られた被験者全員の平均操作時間と平均衝突回数を Fig. 5 に示す。また、操作時間と衝突回数が平均値に近い被験者の軌道データを Fig. 6 に示す。 $t_{pre} = 2$ s の時のデータを (a) に、予測位置表示ナシの場合を (b) に示してある。

Fig. 5 を見ると、予測位置表示が無い場合、最初に行った実験 1 と最後に行った実験 5 では、操作時間も衝突回数も減少している。これは、被験者が操作に慣れたことを意味する。しかし、最後に行った実験 5 と

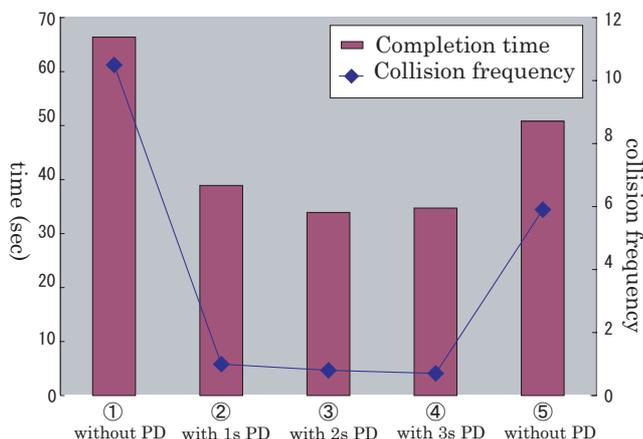


Fig. 5: Task completion time and collision frequency.

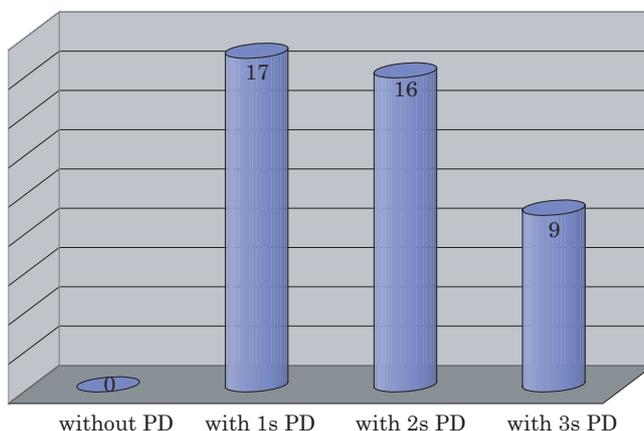


Fig. 7: Results of questionnaire.

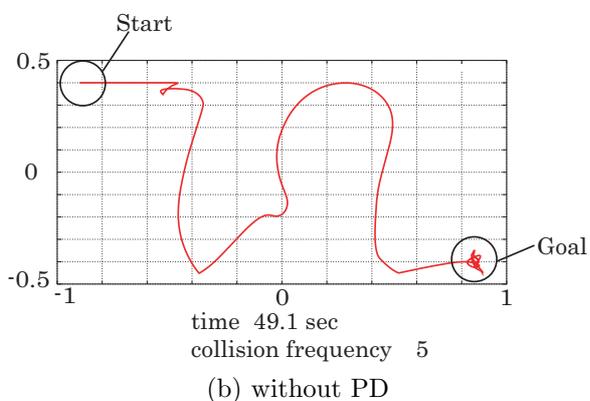
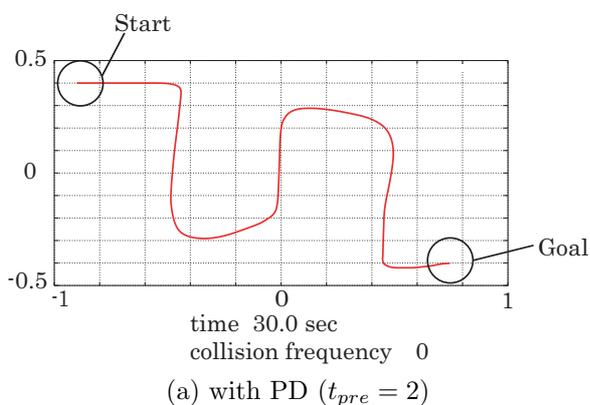


Fig. 6: Trajectory data.

比べても予測位置表示を $t_{pre} = 2$ s として導入した3の場合は、操作時間が66.7%に減少し、衝突回数に関しては13.6%に減少している。これより、提案する予測位置表示を導入することにより、操作時間が短縮され、衝突回数を減少させる効果があることが見て取れる。

さらに、Fig. 6を見ると、(a)の予測位置表示が有る場合の方が、(b)の予測位置表示がない場合に比べ軌道が滑らかあり、衝突もなく安定していることがわかる。特に、ゴール位置付近に注目すると、(b)では、SHBを停止させるために試行錯誤を繰り返しているのに対し、

(a)ではスムーズに停止していることが見て取れる。この現象は、Fig. 6の被験者のみならず、他の被験者に関しても同様の傾向が見られた。

一方、予測時間 t_{pre} に着目すると、 t_{pre} の値によって、若干作業時間や衝突回数にばらつきがあることがわかる。そこで、実験終了後、被験者にどの状態が操作し易かったか、アンケートを実施した。アンケートでは操作し易いと思う順に順位を付けてもらい、1位を3点、2位を2点、3位を1点、4位を0点として操作性を評価した。その結果を Fig. 7 に示す。予測位置表示があるほうが無い場合に比べ操作しやすかったことがわかる。また、予測時間に関しては、 $t_{pre} = 1$ s および $t_{pre} = 2$ s の場合の評価が高く、 $t_{pre} = 3$ s になると、その評価が下がっていることがわかる。被験者のデータとアンケートを比べると、操作時間が短い被験者は、 $t_{pre} = 1$ s の予測時間を好み、操作時間が長かった被験者は $t_{pre} = 2$ s の予測時間を好む傾向が見られた。このことから、予測時間と操作性の関係は、操作ゲインとの関係があると考えられ、これについては、今後検討課題としたい。

5 結論

加速度を直接指令するフリーフライングロボットの遠隔操作システムにおいて、操作性を向上させる予測位置表示手法を提案した。また、7名の被験者による実験を行い、提案する手法の有効性を検証した。その結果、操作時間、衝突回数とも減少し、提案する予測位置表示が有効に働くことを実証した。

参考文献

- [1] <http://ic.arc.nasa.gov/ic/projects/psa/>
- [2] 妻木勇一, Dragomir Nenchev, 船内フリーフライヤシステム, 第45回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 787-790, 2001.
- [3] Y. Tsumaki, M. Yokohama, D. N. Nenchev, Intra-Vehicular Free-Flyer System, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2547-2552, 2003.