

— 追加ロボット実験報告 —
宇宙ロボットのダイナミクスに
注目したロボット制御実験

ETS-VII「おりひめ・ひこぼし」
実験成果報告会 2000. 3. 14

東北大学 大学院 工学研究科
航空宇宙工学専攻 助教授
吉田 和哉

ETS-VII 追加共同ロボット実験について

ETS-VII: ロボットアームを搭載した世界初の無人口ロボット衛星

- (1)軌道上でのロボット操作技術および
- (2)衛星同士のランデブー・ドッキング技術の検証・確立を目的とする。

1997年(平成9年)11月28日, H-II ロケット6号機にて打ち上げ。

1999年(平成11年)5月31日, 当初予定の実験ミッションを成功裏に終了。

当初ミッション終了後も衛星は良好な運用状態にある。

学術的にまたとない実験機会となりうる。



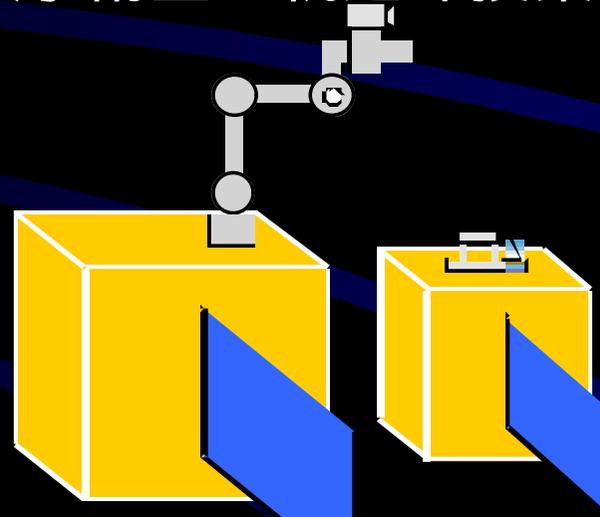
追加実験の公募

追加実験に参加した大学 **東北大学**, 東京工業大学, 京都大学

宇宙ロボットのダイナミクスに注目した ロボット制御実験

実験の背景1 = Satellite Servicing

- 燃料補給, メンテナンスによる既存衛星の延命
- 故障(不具合)衛星の捕獲・回収・修理
- ミッション終了衛星の軌道外投棄

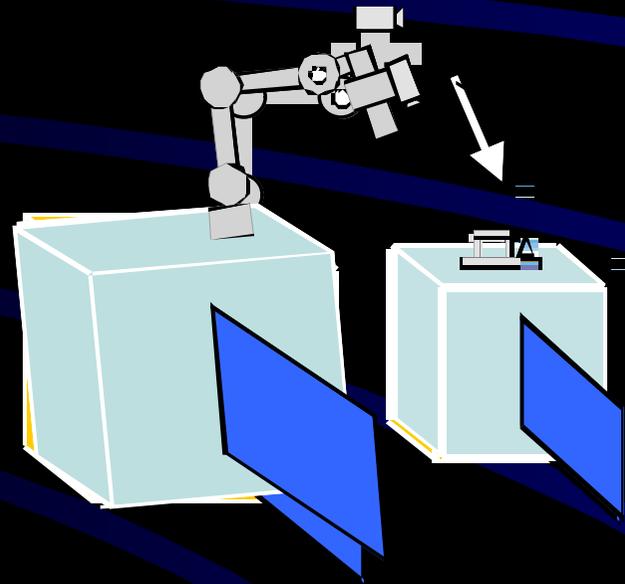


軌道上で衛星を捕獲する

捕獲した衛星に対して精細な作業を行う

宇宙ロボットのダイナミクスに注目した ロボット制御実験

実験の背景2 = フリーフライングロボットの宿命



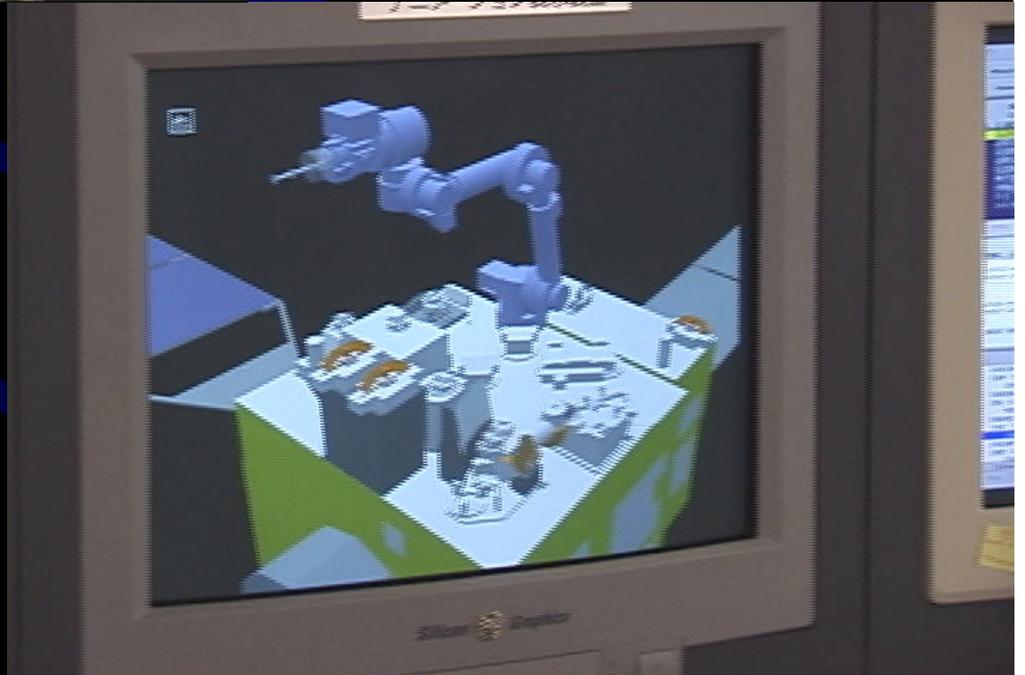
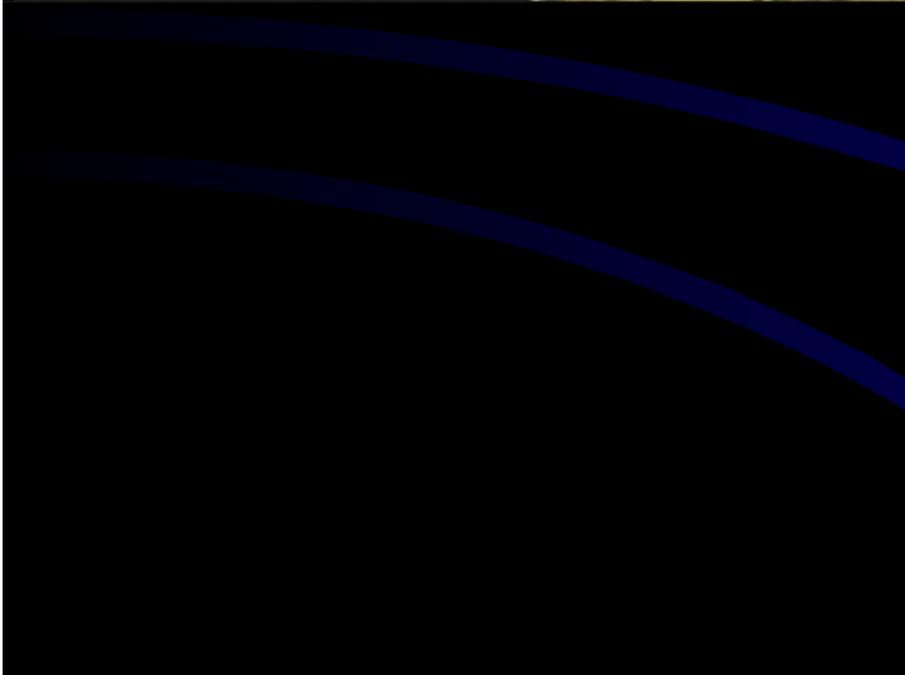
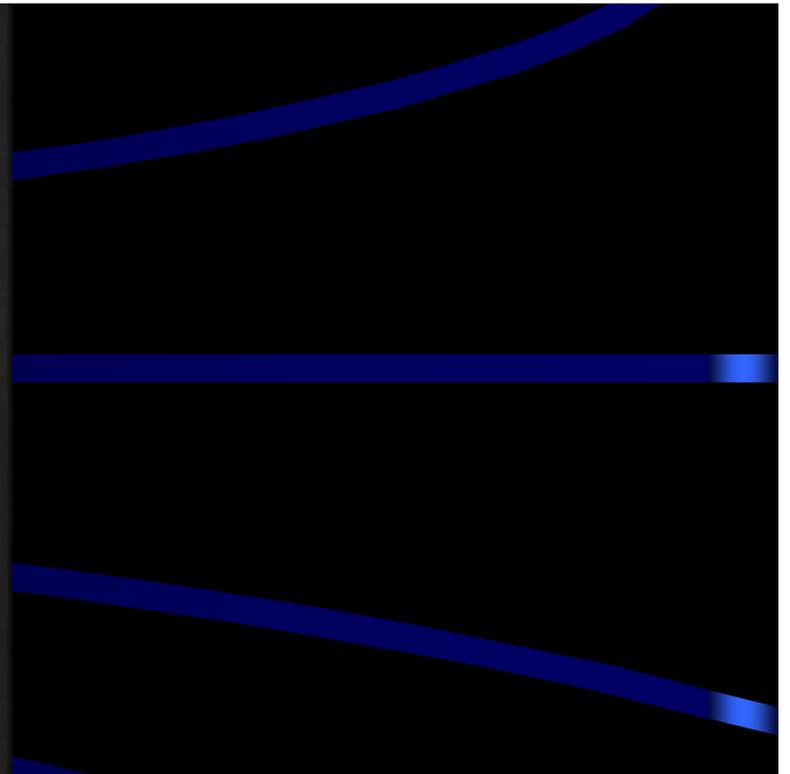
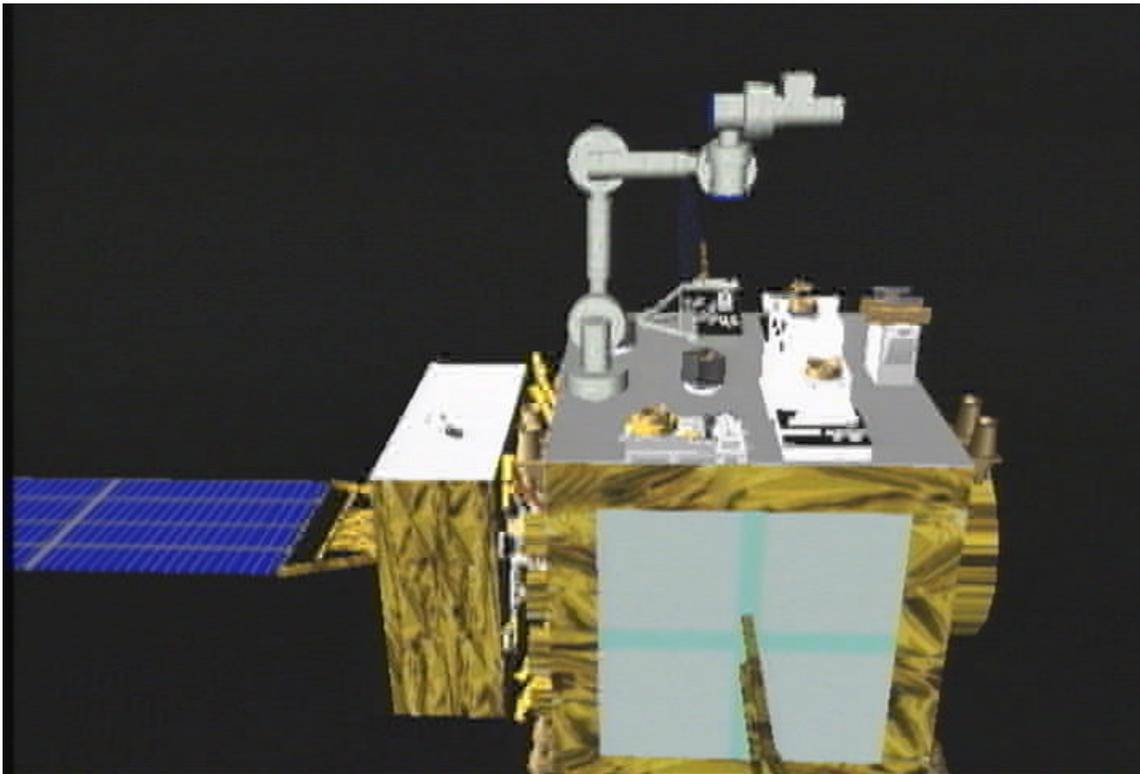
ベースの反動を考慮したロボットアームの制御法

実験項目

1. 衛星の姿勢に反動外乱を与えないロボットアームの操作
無反動マニピュレーション
2. ベースの反動を考慮に入れてアーム先端を慣性系に対して軌道追従させる制御法
一般化ヤコビ行列
3. ベース反動の回復を早める姿勢制御法
バイアス協調制御法
4. アームと衛星姿勢の最終値制御
非ホロノミック軌道計画法

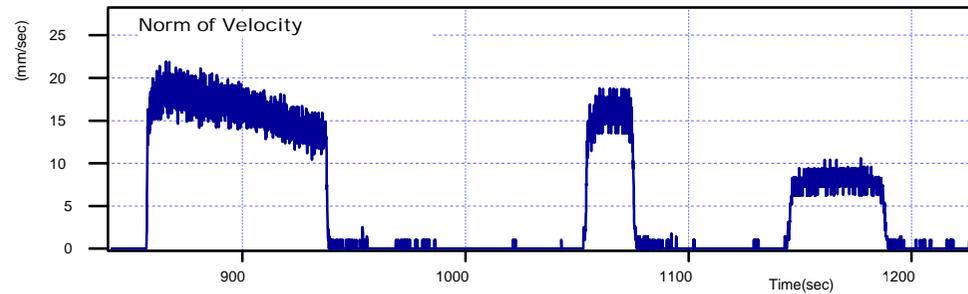
軌道上実験

- 実験実施日：平成11年9月30日
- 実験時間： 午前7時21分～午前11時25分
3フライトパス, 計およそ72分
- アームの操作方法：あらかじめ動作軌道ファイルとして用意しておいたアームの運動目標値を逐次送信し, PTP追従モードで衛星上のロボットアームを操作する.
- 衛星の姿勢制御法：フィードバック制御, 協調制御, フリードリフトの各モードを適宜切り替えて実施.
- 実験データ: 衛星のダイナミクス解析に必要な運動データのテレメトリ計測値を記録する.

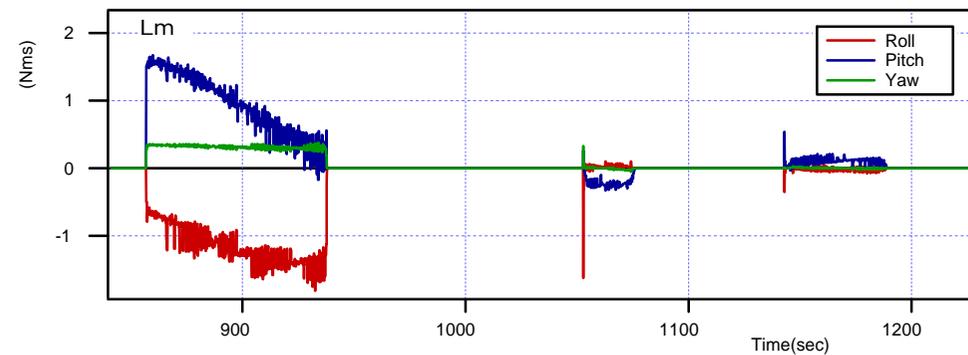


実験結果1 無反動マニピュレーションの実験(1)

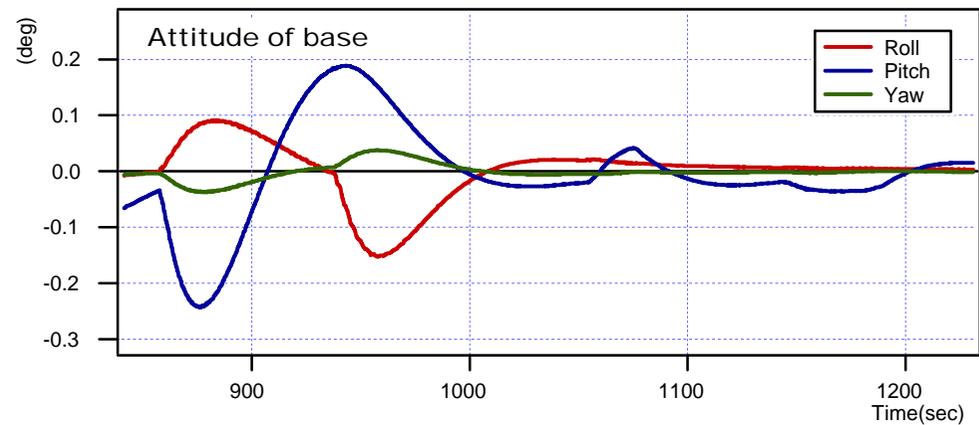
ハンド速度
(mm/sec)



反動角運動量
(Nm·s)

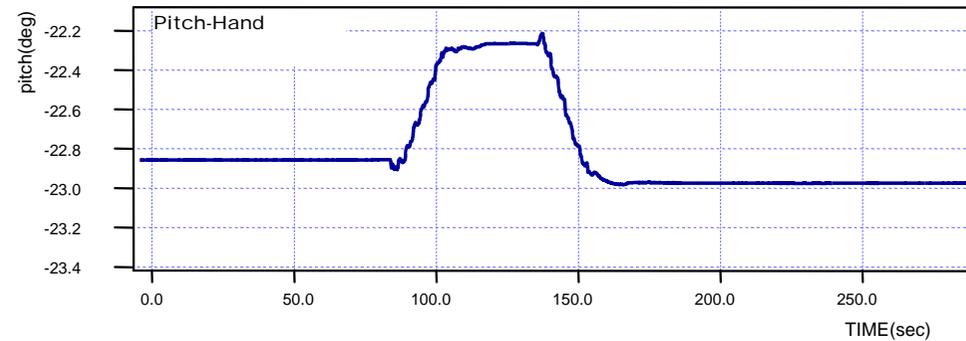


姿勢変動
(deg)

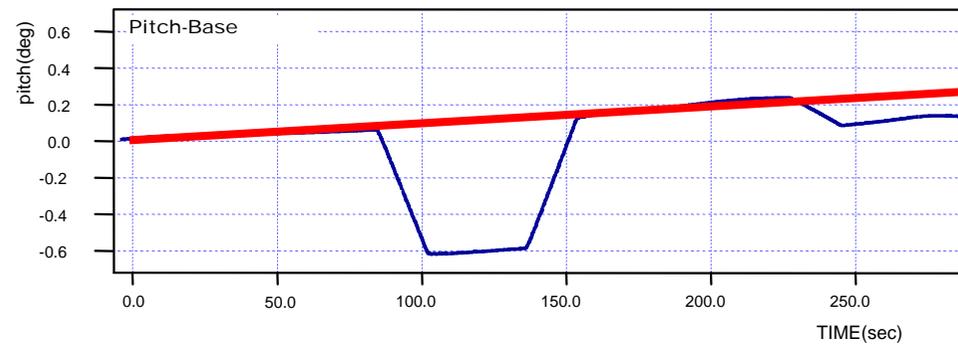


実験結果 2 一般化ヤコビ行列を用いたアームの制御

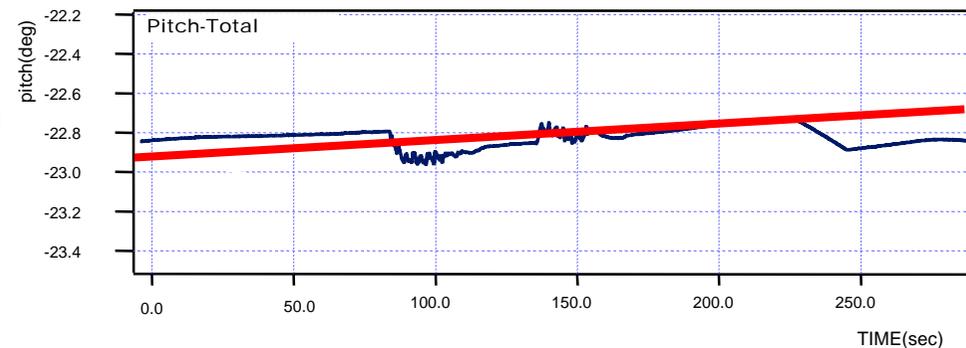
ベースからみた
ハンド姿勢 (pitch)



衛星姿勢 (pitch)



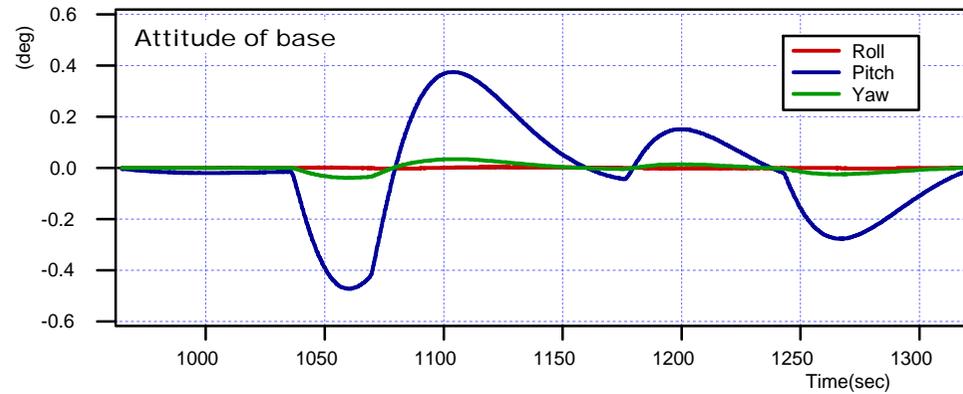
衛星からみた
ハンド姿勢 (pitch)



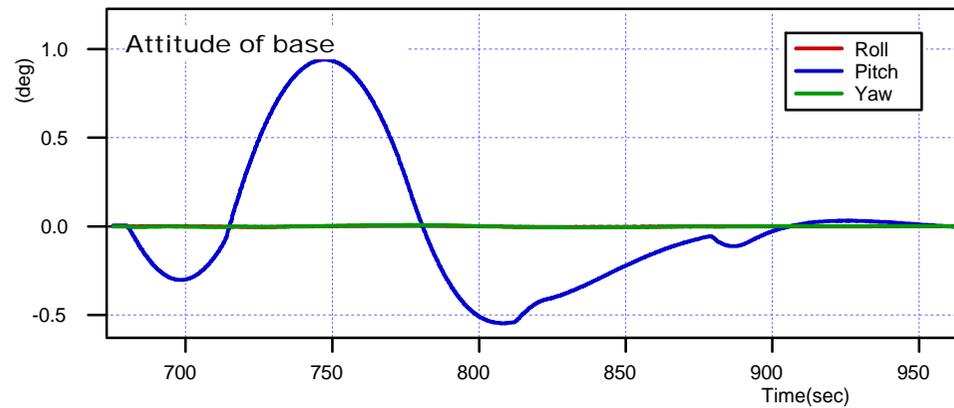
実験結果 3

各種姿勢制御法の比較

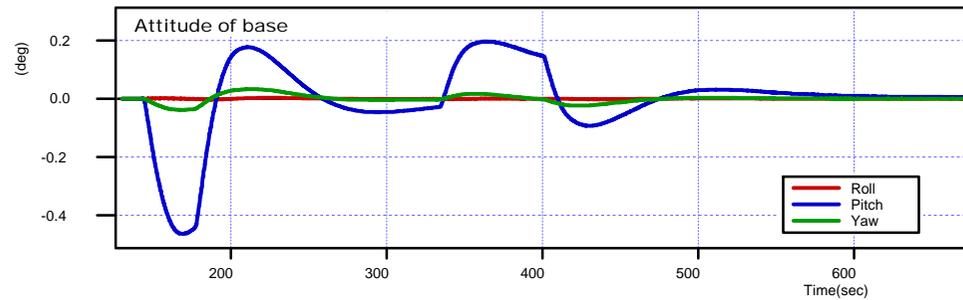
通常FB制御



FF協調制御法

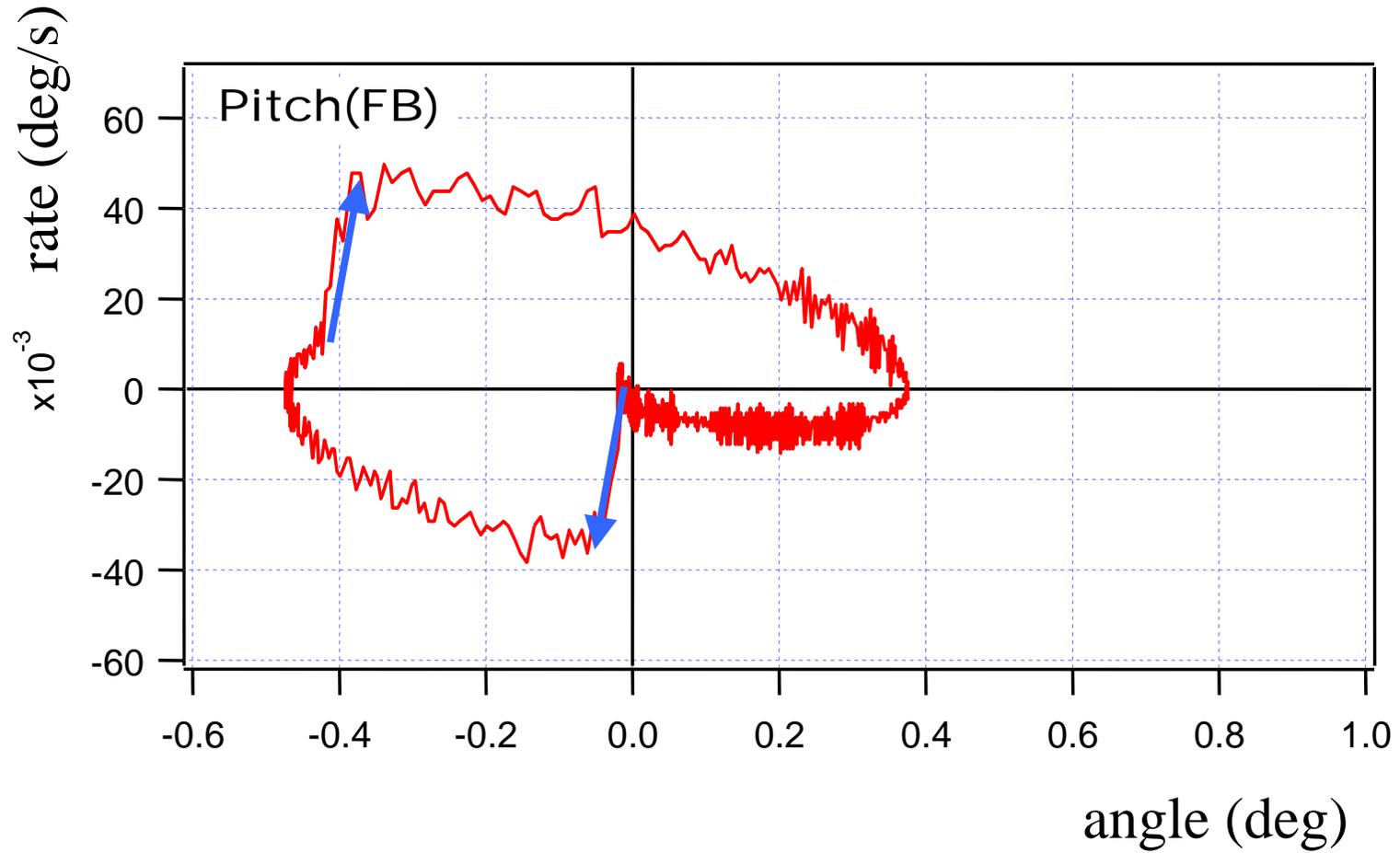


バイアス協調制御法



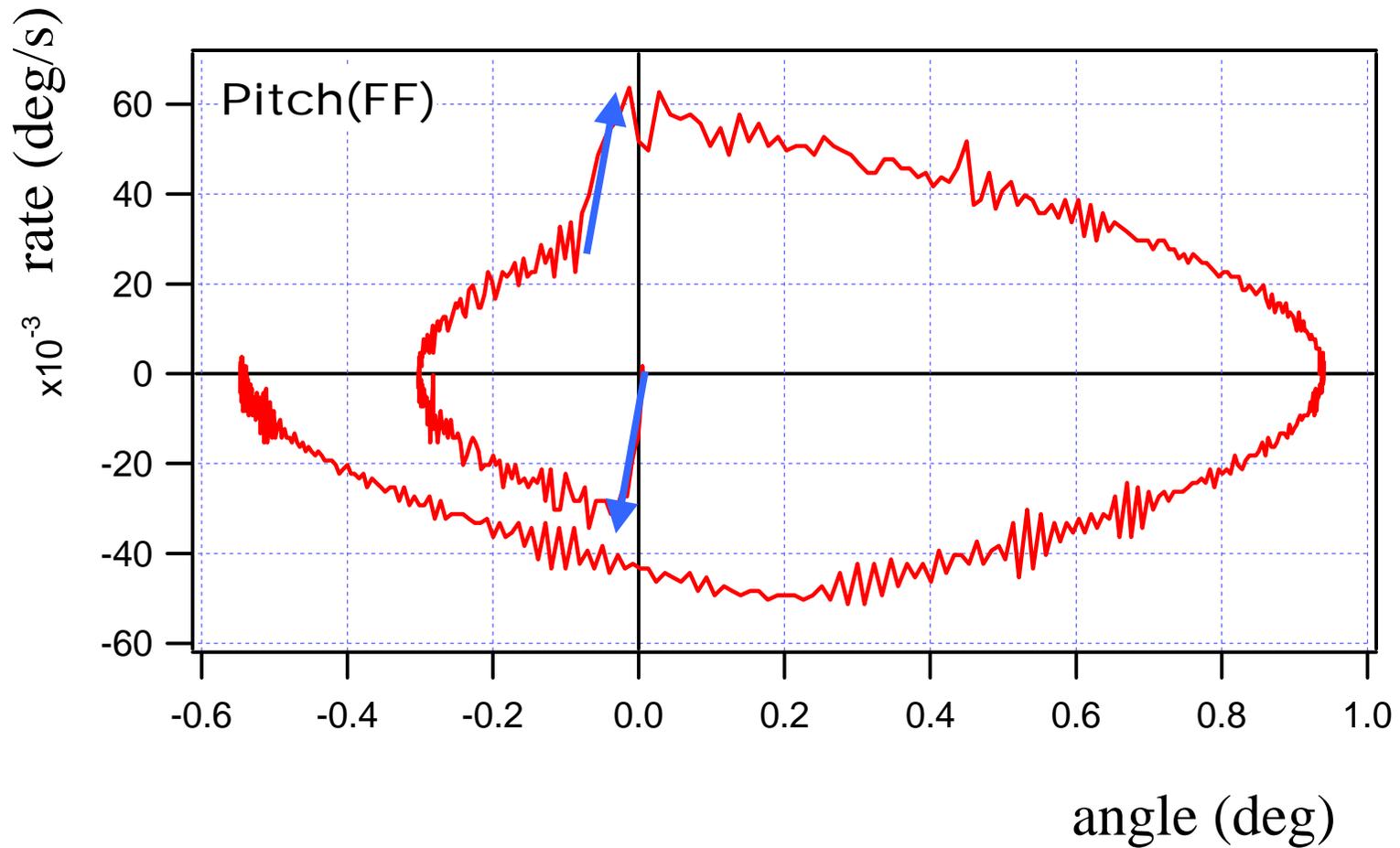
実験結果 3-1

通常FB制御



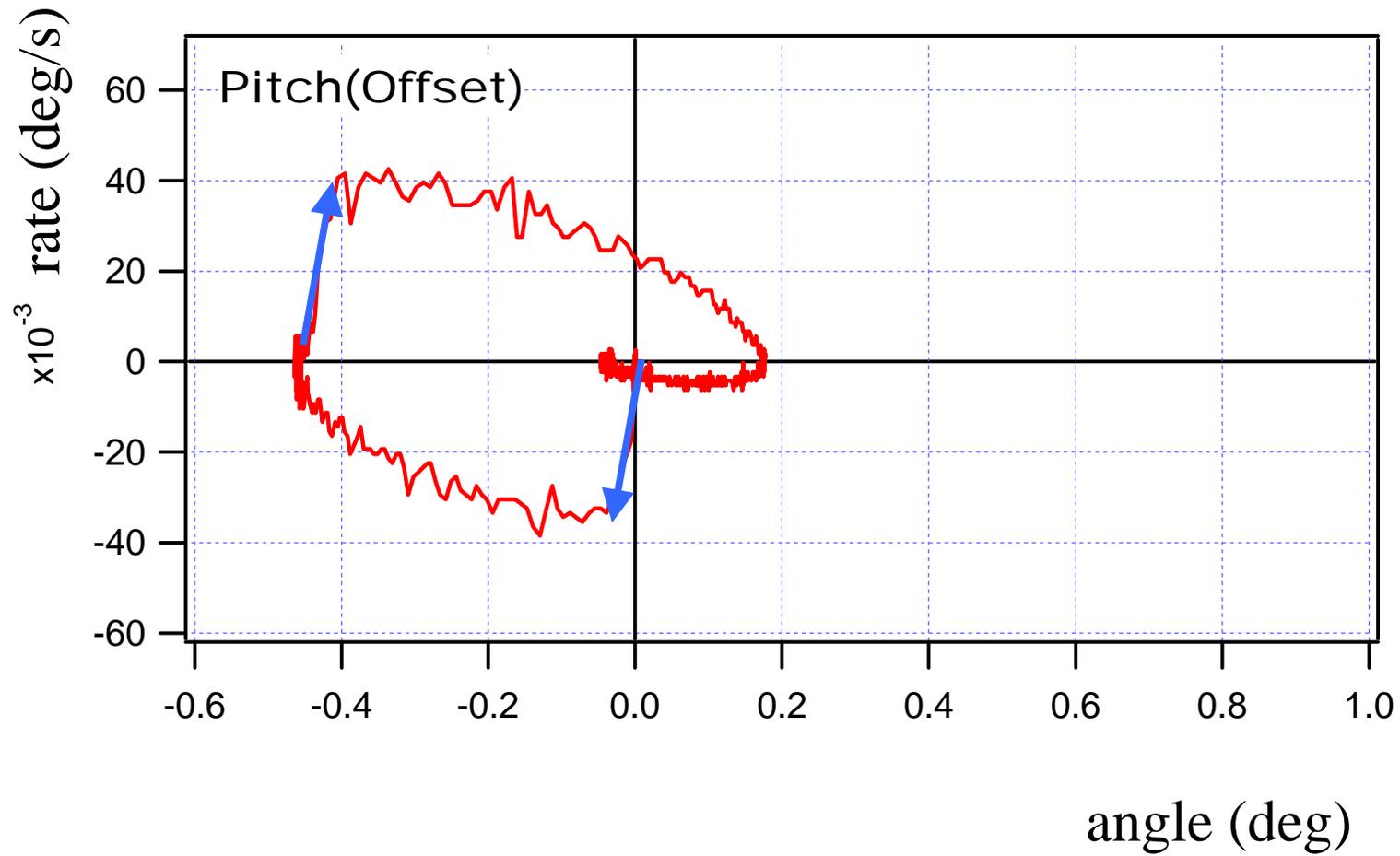
実験結果 3-2

FF協調制御法



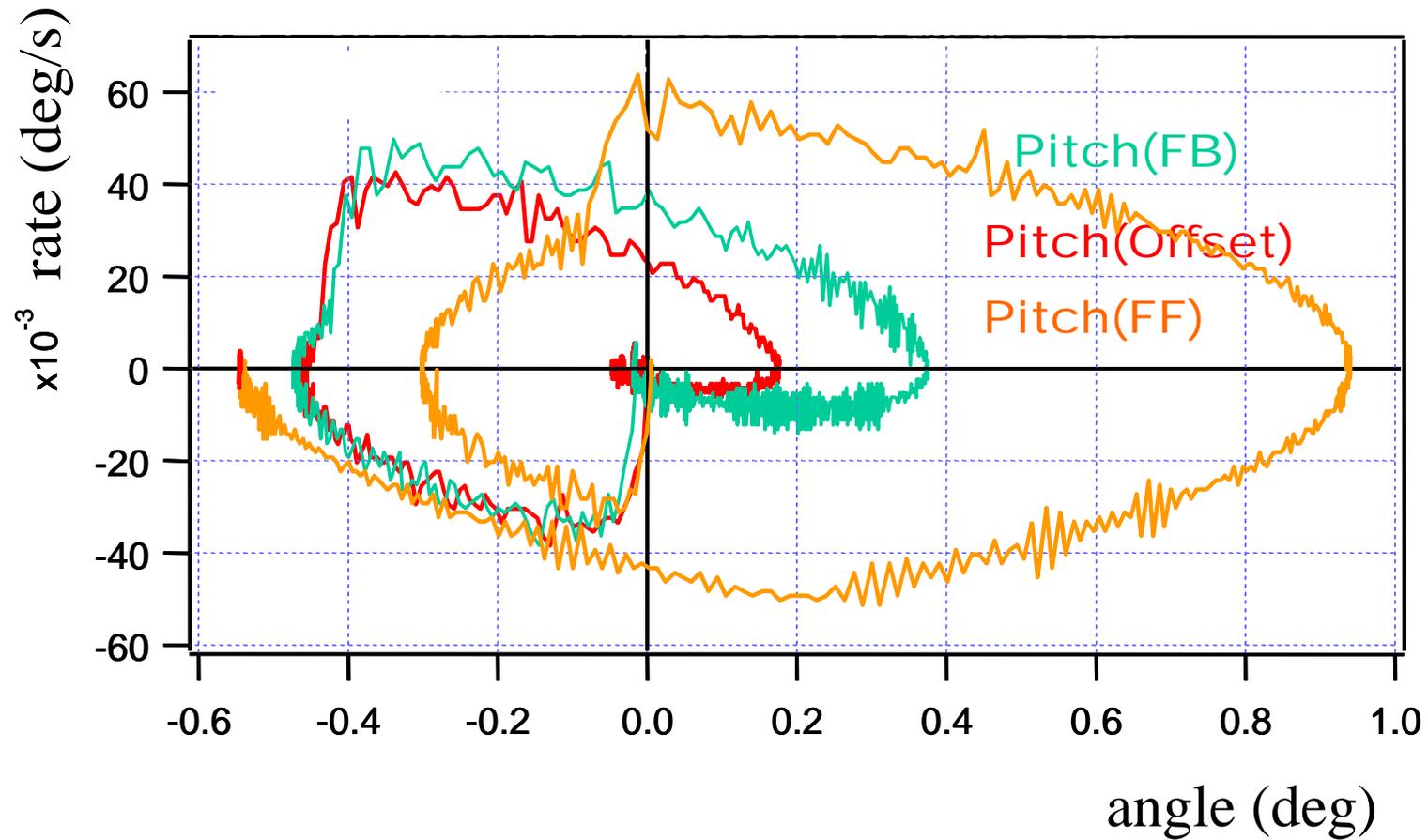
実験結果 3-3

オフセット協調制御



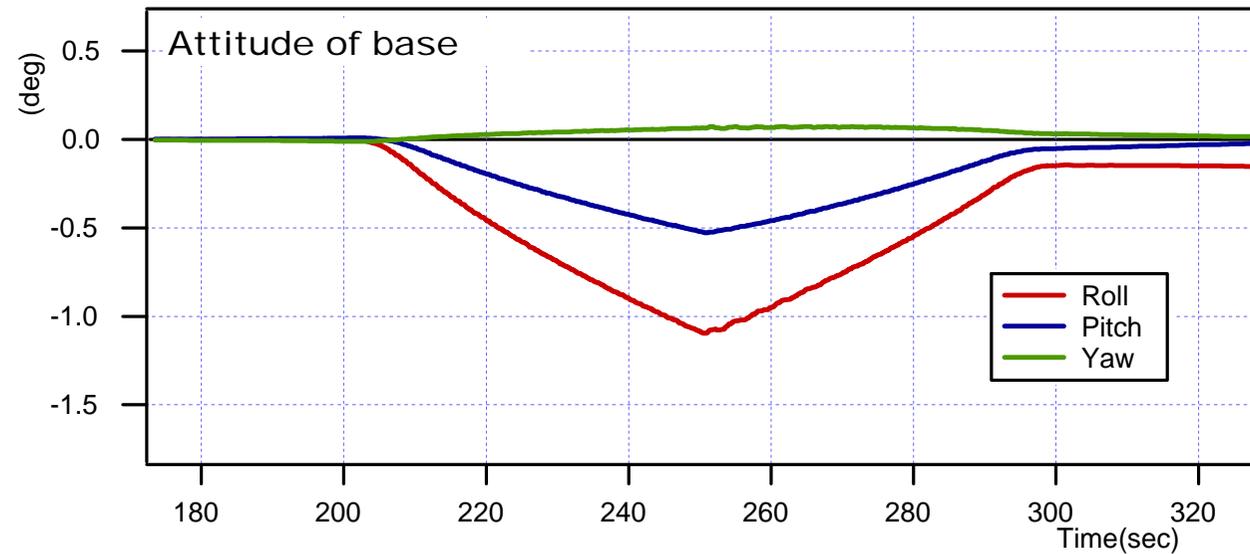
実験結果 3

各種姿勢制御法の比較

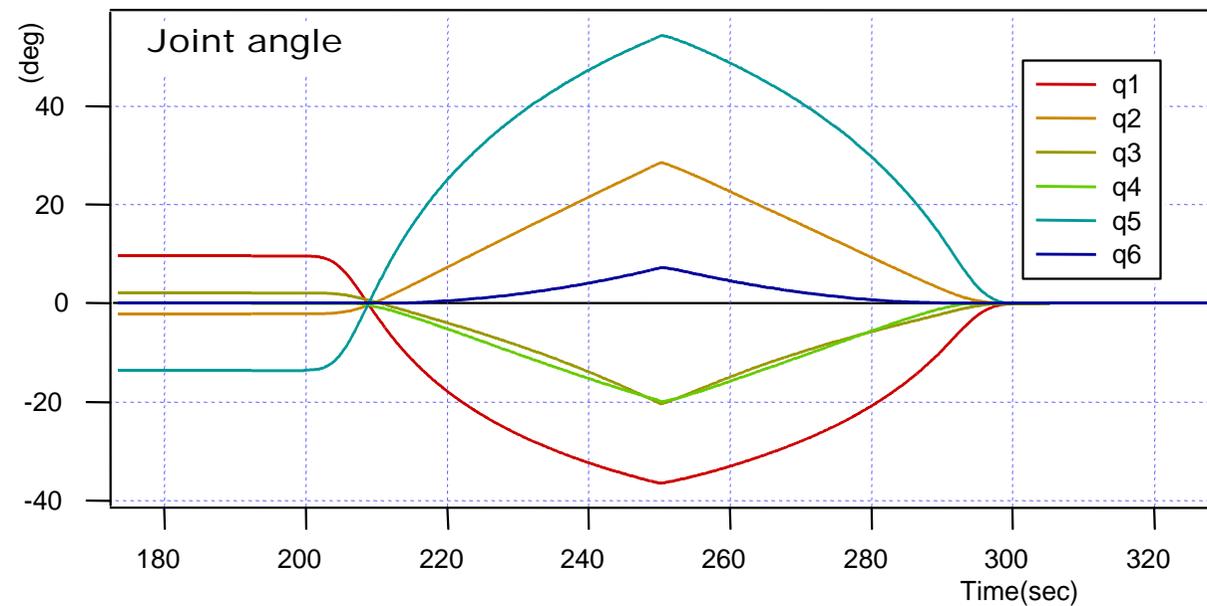


実験結果 4 非ホロノミック軌道計画による終端値制御

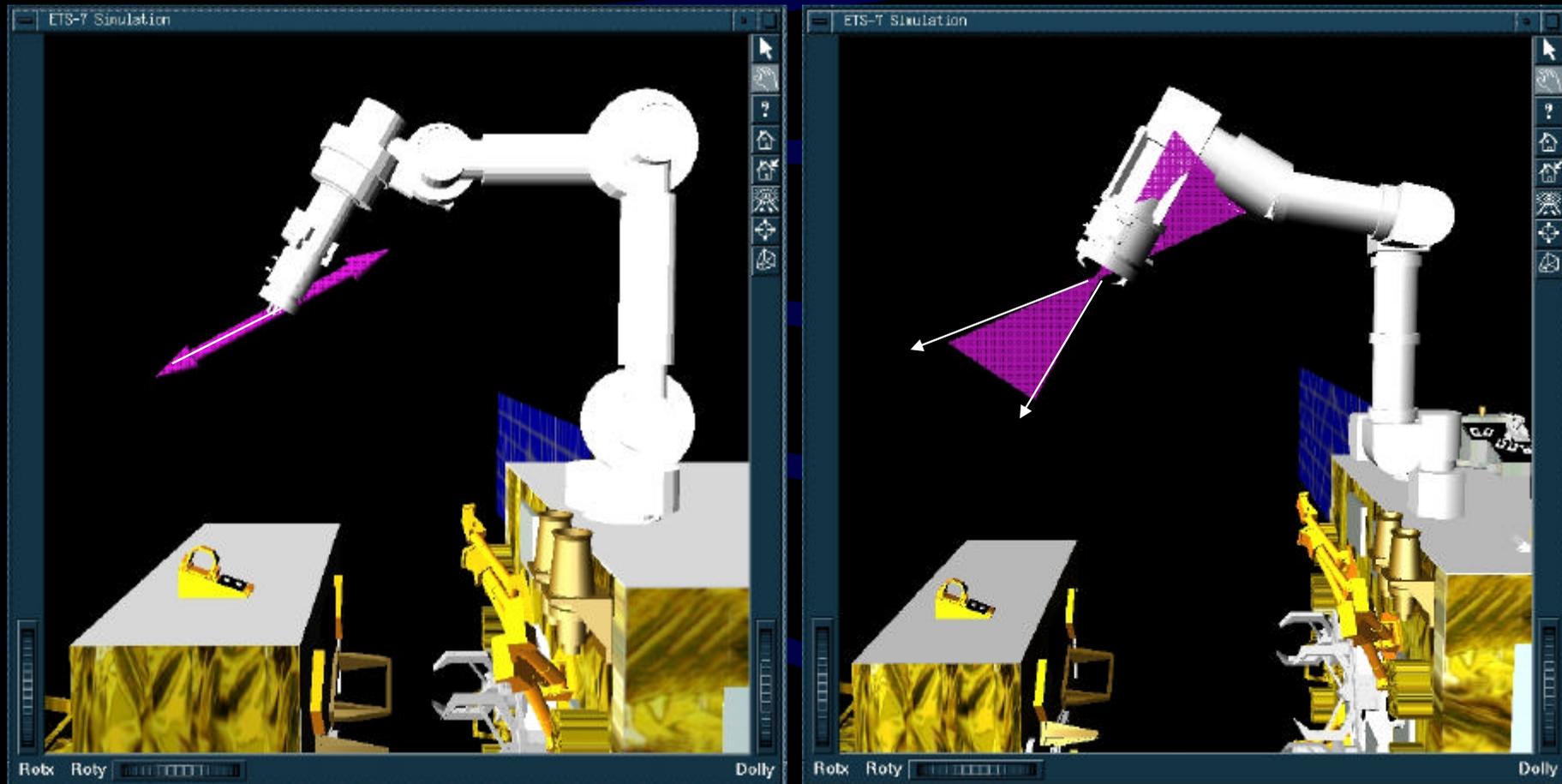
衛星姿勢
(deg)



アーム関節角
(deg)



実験結果の考察(1):無反動マニピュレーション

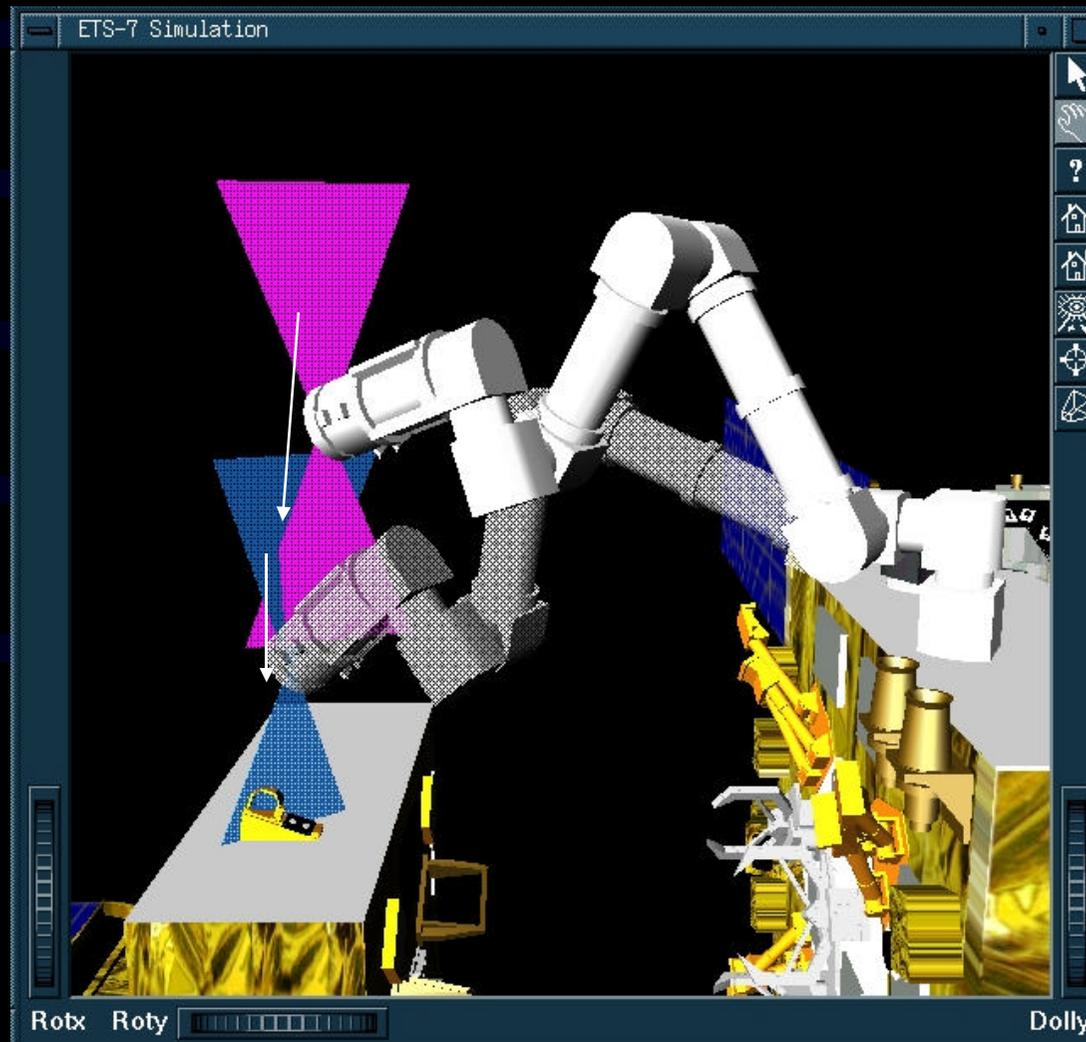


無反動マニピュレーション:

6自由度アーム 1方向に限られる

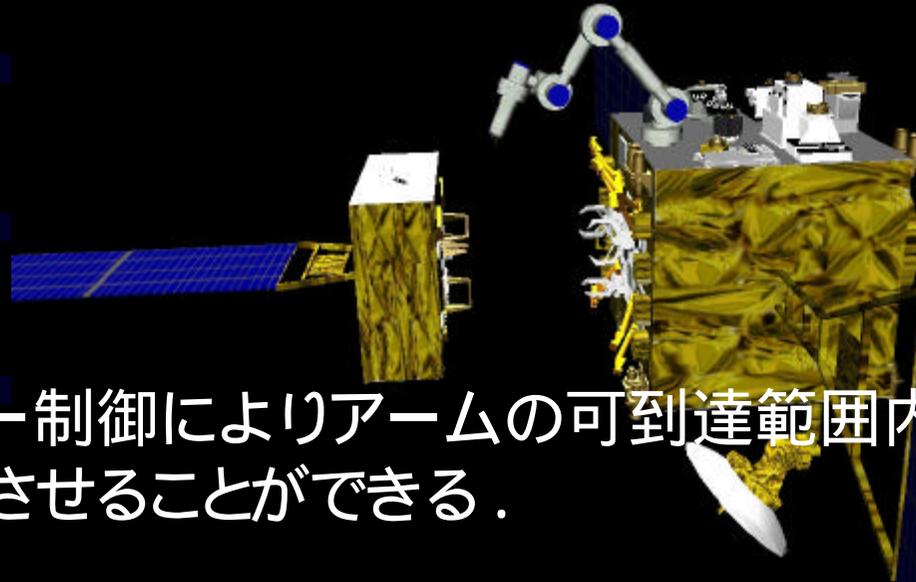
7自由度アーム 1自由度の冗長性をもって,動作可能

7自由度アームを用いた 無反動マニピュレーションの例



実験結果の考察(2):ターゲット衛星の軌道上捕獲 仮定

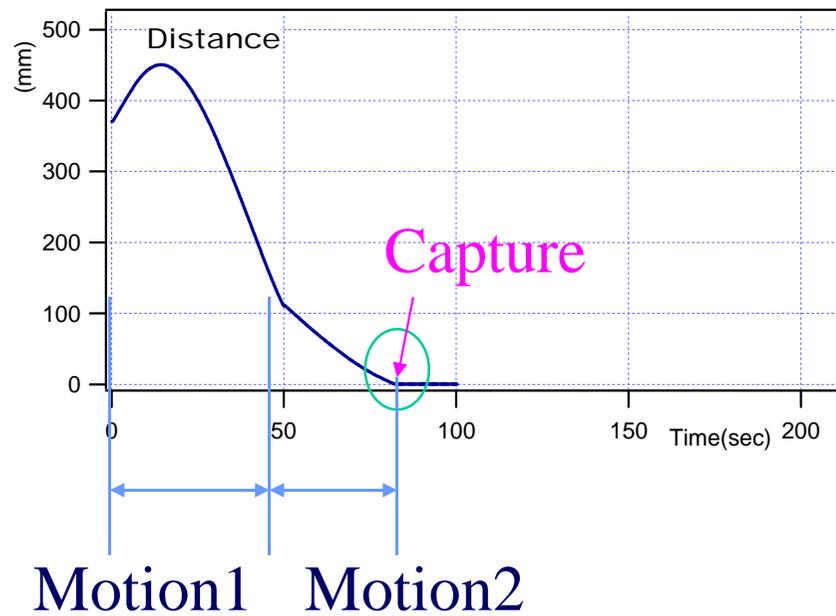
- モデルとしてETS-VIIのターゲット/チェイサーの力学パラメータを仮定
- ターゲットには、フィクスチャと画像マーカが取り付けられている。



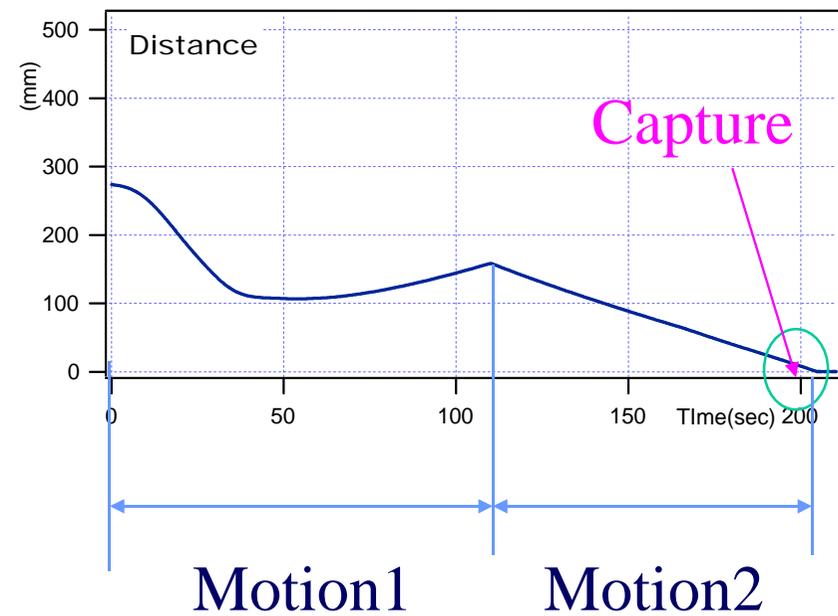
- ランデブー制御によりアームの可到達範囲内にターゲットを相対停止させることができる。
- アームの初期アプローチ: 衛星姿勢制御ON + ハンドPTP制御
最終アプローチ: フリードリフト + Visual Servo Tracking

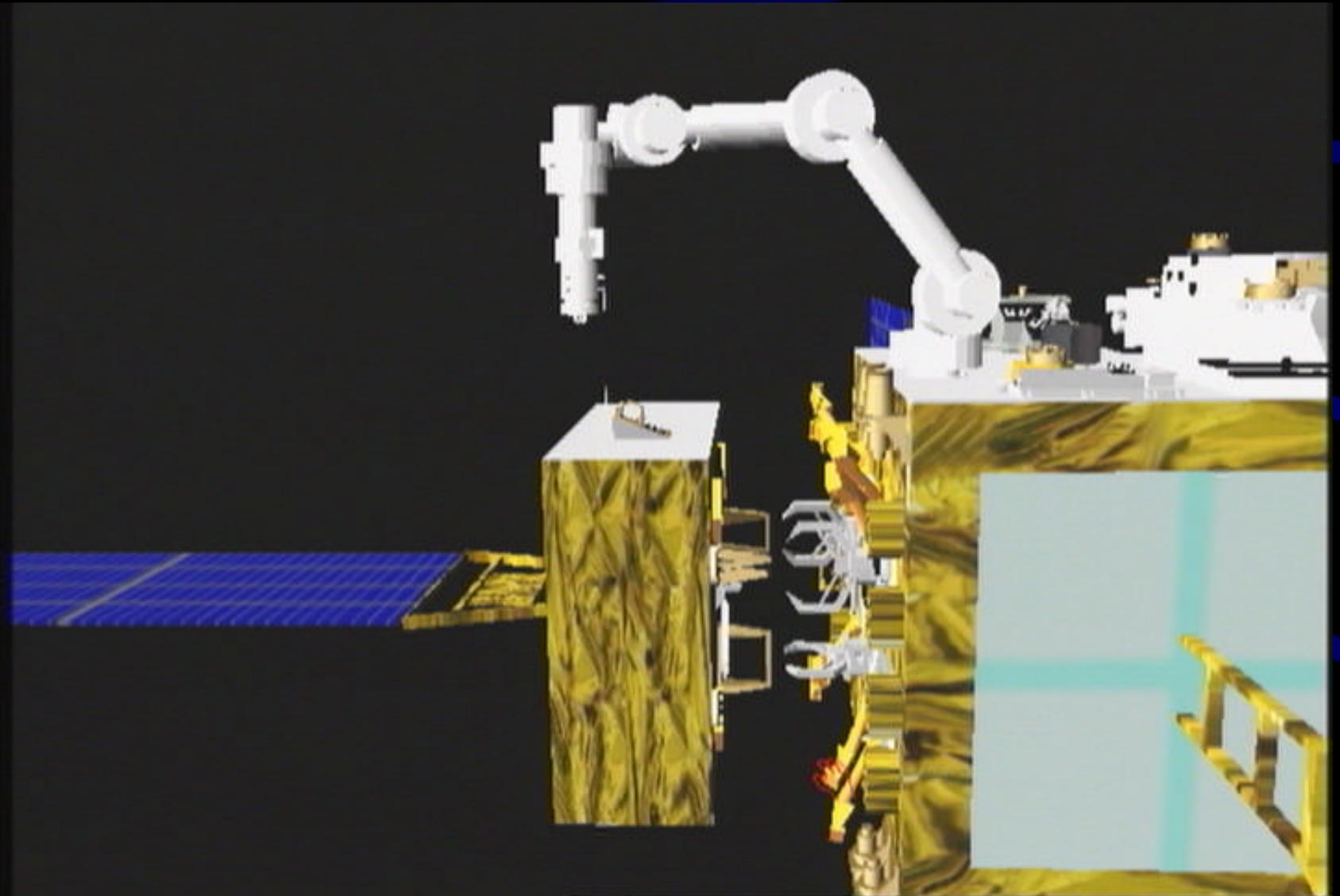
ターゲット捕獲シミュレーション例

無反動アプローチ + 一般化ヤコビ



通常アプローチ + 通常ヤコビ





まとめ

- 軌道上のロボット実験衛星 (ETS-VII) を用いて、宇宙ロボットのダイナミクスに注目したロボット制御実験を実施した。
- 実験内容は、将来 Satellite Servicing を実現するために不可欠である、衛星捕獲のための新しいロボットアームと衛星姿勢の制御手法を検証するものである。
- いずれの実験においても有益なデータを取得することができた。
- 軌道上実験にて検証された制御方式を用いて、衛星捕獲の様子をシミュレーションにて検討した。

ETS-VII Fact Sheet

- 名称 技術試験衛星VII型，略称ETS-VII（イーティーエス・セブン）
（全体の愛称「きく7号」，ランデブー・ドッキング実験のために軌道上でふたつに分離した際のチェイサ衛星の愛称「ひこぼし」，同ターゲット部分の愛称「おりひめ」．）
- 打ち上げ 1997年（平成9年）11月28日，H-IIロケット6号機にて
- 軌道 高度約550km，軌道傾斜角35度
- 衛星全体の重さ 約2.5トン
- 衛星の目的 (1)軌道上でのロボット操作技術および(2)衛星同士のランデブー・ドッキング技術の検証・確立．
- ロボットアーム 全長約2メートル，6関節
- 衛星の開発と運用主体 宇宙開発事業団(NASDA)
- ロボット実験に参加した機関 科学技術庁航空宇宙技術研究所，通商産業省工業技術院電子技術総合研究所，郵政省通信総合研究所
- 共同ロボット実験に参加した外国の機関 欧州宇宙機関(ESA)，ドイツ航空宇宙研究所(DLR)
- 追加共同ロボット実験に参加した大学 東北大学，東京工業大学，京都大学
- 最後のロボット実験 1999年（平成11年）11月29日
- 実験運用終了 1999年（平成11年）12月17日（予定）