宇宙ロボット運用の観点から見た多関節 アームコンフィギュレーションの評価指標*

若田 光一^{*1}, 柴田 智哉^{*2}, 狼 嘉彰^{*3}

Evaluation Criteria for Multi-Joint Arm Configuration in Space Robotics Operations

Koichi WAKATA, Tomoya SHIBATA and Yoshiaki OHKAMI^{*4}

^{*4} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

The Canadian Space Station Remote Manipulator System (SSRMS) that consists of 7 joints has been in operation since 2001 aboard the International Space Station (ISS). The extensive operational experience of the Space Shuttle's Remote Manipulator System (SRMS), which has 6 joints, played a significant role in the design and operation of the ISS robotics. However, optimization of the ISS robotics operation for different types of tasks utilizing the unique redundancy characteristics of the 7-joint systems is still underway. In this study, we have proposed three evaluation indices for multi-joint arm configurations in order to avoid collision with surrounding structures. Based on the evaluation of operations of the SSRMS a demonstration model, it has turned out that the proposed indices are beneficial for enhancing clearance monitoring of the arm with respect to the surrounding structures. Furthermore we have proposed an operation support display to contribute to the operational safety and mission success.

Key Words: Space Robotics, Manipulator, Maneuverability, Human Interface, Kinematics, Arm Configuration Change

1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)では、カナダの Space Station Remote Manipulator System^{(1)~(3)}(SSRMS, 通称カナダアーム 2)が 2001 年 4 月から運用されており、今後、「きぼう」日本実験棟の Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS)の親アームと子アーム、カナダの Special Purpose Dexterous Manipulator System (SPDM)やヨーロッパの European Robotic Arm (ERA)が加わる予定である。

最初の有人宇宙ロボティクスであるスペースシャトルの Shuttle Remote Manipulator System (SRMS)や日本の JEMRMS が 6 関節のアームであるのに対して、SSRMS, SPDM, ERA は 7 関節のアームとなっている。ISS のロボティクスの設計および運用には 6 関節アームである SRMS の 20 年以上にわたる

豊富な運用経験が生かされてきているが、7 関節アームである SSRMS では、7 関節特有の冗長性を活用した作業内容に応じた運用方法の最適化が現在検討されつつある段階にあると言えよう。

本研究では、SSRMS を例証モデルとして取り上げ、多関節アームの運動学特性を明らかにし、運用安全、ミッション達成、オペレータ訓練の効率化等に寄与すると考えられるアームコンフィギュレーション評価指標の提言を行う。本報では 2 章で SSRMS のシステム概要を述べ、3 章で運動学特性、4 章で評価指標を提案しある運用経路を例に評価結果を示し、5 章では提案する評価指標を応用したオペレータ操縦支援ディスプレイについて述べる。

2. SSRMS システム概要

例証モデルとして取り上げる SSRMS の順運動学、操作モード、操縦インターフェイスの概要を述べる。

2.1 順運動学 SSRMS の構造概要を図 1 に示す。SSRMS は 7 関節を有する冗長アームとなっており、その関節自由度は根元から Roll-Yaw-Pitch-Pitch-Pitch-Yaw-Roll となっている。各関節角を根元から

$$\theta_{SR}, \theta_{SY}, \theta_{SP}, \theta_{EP}, \theta_{WP}, \theta_{WY}, \theta_{WR}$$

* 原稿受付 2002 年 10 月 21 日。

^{*1} 宇宙開発事業団 (mail code CB, Johnson Space Center, 2101 NASA Road 1, Houston TX, 77058-3696, USA)。

^{*2} 慶応義塾大学大学院理工学研究科[現在 NEC 東芝スペースシステム(株)]。

^{*3} 正員、慶応義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

E-mail: ohkami@sd.keio.ac.jp

各リンクに取付けられた基底座標

$$\{a^i\}, \quad (i=0, 1, \dots, 6, 7)$$

で表される座標系を A_i , 各リンクベクトルを

$$r_i = \{a^i\}^T r_i, \quad (i=0, 1, \dots, 6, 7)$$

A_i 系から A_{i+1} 系への方向余弦行列を

$$C^{A_{i+1}/A_i}$$

とし, アーム先端の位置ベクトル R_e を

$$R_e = r_0 + r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6 + r_7 \dots (1)$$

とする.

2.2 操作モード 本論文ではオペレータが直接回転操縦桿(RHC: Rotational Hand Controller), 並進操縦桿(THC: Transnational Hand Controller)を用いてアーム先端やペイロードの位置および姿勢を示す座標系(FOR: Frame of Resolution)を操作するマニュアルモードを対象とする. 同モードには次の3種類の操作モードが存在する.

(1) 各関節変位角の二乗和を最小とする逆運動学によって導かれる7関節すべてを可動させる7 Joints-Mode.

(2) ショルダロール(SR: Shoulder Roll)関節, ショルダヨー(SY: Shoulder Yaw)関節どちらかにゼロ速度指令を与え固定させ, 6関節特異点に近づくとして固定していた関節を開放し7関節運用とする SR/SY Held-Mode.

(3) 常に SR 関節, SY 関節どちらかにゼロ速度指令を与え固定させ運用する SR/SY Locked-Mode.

上記より, 7関節可動運用, SR または SY 関節固定 6関節可動運用の3種の運用状態における運動学特性を把握する必要がある.

2.3 人間機械系インタフェース SSRMS 操縦

Fig. 1 Overview of SSRMS

インタフェース(RWS: Robotic Work Station)を図2に示す. 運用中オペレータに与えられる情報は, テレビ映像などの視覚情報によるアーム全体のコンフィギュレーションや, アームおよび把持したペイロードと周囲とのクリアランス, さらに FOR および各関節角の数値データ等である. オペレータにはアームのピッチ面の挙動を瞬時に認知することが難しいため, 映像による情報のみによって周囲の構造物との干渉に注意しなければならない. さらに, 特異点近傍ではアーム全体のコンフィギュレーションが大きく変化するため, 今のところオペレータには7関節特異点に関する情報は与えられるが, 6関節特異点に関する情報は与えられていない.

3. 運動学特性

3.1 特異点解析 ロボットアームにおける特異点とはアーム先端の並進3, 回転3, 計6自由度のうち, 1自由度以上が失われる点を指す. つまり, 並進, 回転自由度のうちのいずれかが失われれば特異点となるので, 並進に関する特異点, 回転に関する特異点と個別に考えても差支えない. さらに, 実際の作業を考えるとリスト関節3自由度でアーム先端姿勢を調節し, ショルダとエルボ関節でアーム先端位置を調節している. したがって回転に関する特異点はリスト関節が支配的であり, 並進に関する特異点はショルダ, エルボ関節が支配的であると考え, 回転, 並進に関する特異点をそれぞれ明らかにする.

3.1.1 回転に関する特異点 回転に関する特異点を「位置を変化させることなく姿勢のみを変化させることができなくなる点」と解釈することにする. 位置を変化させることに伴い姿勢も変化する状況は実際の作業を考えると有効なものではないかと考えられるためである. したがって, 7関節運用, SR 固定, SY 固定運用に関係なくアーム先端姿勢は手首関節 θ_{wp} ,

Fig. 2 Robotic work station (RWS)

θ_{WY}, θ_{WR} にのみ依存するものとする。

基底ベクトル $\{\mathbf{a}^4\}$ で表される下腕リンク固定座標系 A4 系から基底ベクトル $\{\mathbf{e}\}$ で表されるアーム先端座標系を E 系とすると, A4 系から E 系までの方向余弦行列 $C^{E/A4}$ は

$$C^{E/A4} = C_1(\theta_{WR})C_3(\theta_{WY})C_2(\theta_{WP}) \cdots (2)$$

となる。また E 系の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_E$ を

$$\boldsymbol{\omega}_E \equiv \boldsymbol{\omega}^{A4/E} = \{\mathbf{e}\}^T \begin{bmatrix} \omega_{E1} \\ \omega_{E2} \\ \omega_{E3} \end{bmatrix} \cdots (3)$$

とすると, 角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_E$ は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_E &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{WR} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_1(\theta_{WR}) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{WY} \end{bmatrix} \\ &\quad + C_1(\theta_{WR})C_3(\theta_{WY}) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_{WP} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sin \theta_{WY} & 0 & 1 \\ \cos \theta_{WR} \cos \theta_{WY} & \sin \theta_{WR} & 0 \\ -\sin \theta_{WR} \cos \theta_{WY} & \cos \theta_{WR} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{WP} \\ \dot{\theta}_{WY} \\ \dot{\theta}_{WR} \end{bmatrix} \\ &= G_W(\theta_W) \dot{\theta}_W \cdots (4) \end{aligned}$$

となる。ここで,

$$\det [G_W(\theta_W)] = \cos \theta_{WY} \cdots (5)$$

より,

$$\theta_{WY} = \pm \frac{\pi}{2}$$

の場合, 姿勢に関する特異点となる。

3・1・2 並進に関する特異点 並進に関する特異点は以下に示すピッチ面の回転を表す変数 ϕ および SY 関節角 θ_{SY} が重要なパラメータであることを示す。

図 3 に示すようショルダ部, エルボ部, リスト部の

Fig. 3 Definition of pitch triangle plane (PTP)

3 点で構成されるピッチ三角平面 (PTP: Pitch Triangle Plane) を考える。基底ベクトル $\{\mathbf{a}^0\}$ で表されるアーム根元に取り付けられた座標系を A0 系, PTP に取り付けられた基底ベクトル $\{\mathbf{p}\}$ で表される PTP 固定座標系を P 系とすると A0 系に対する P 系のピッチ軸回転 ϕ は図 4 より

$$\phi = \theta_{SP} + \frac{1}{2} \theta_{EP} \cdots (6)$$

となる。なおショルダ部とリスト部を結ぶ直線軸を P 系ロール軸とする。

エルボ関節 θ_{EP} が

$$\theta_{EP} = 0, \pm \pi$$

の場合は明らかに可到達領域境界上の特異点となる。また, 可到達領域内の特異点はアーム先端位置が PTP 姿勢に大きく依存することに注目すれば以下に示す PTP 角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_P$ より求められる。

A0 系から P 系までの方向余弦行列 $C^{P/A0}$ は式 (6)

で定義した ϕ を用いて

$$C^{P/A0} = C_2(\phi)C_3(\theta_{SY})C_1(\theta_{SR}) \cdots (7)$$

とする。また, P 系の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_P$ を

$$\boldsymbol{\omega}_P \equiv \boldsymbol{\omega}^{P/A0} = \{\mathbf{p}\}^T \begin{bmatrix} \omega_{P1} \\ \omega_{P2} \\ \omega_{P3} \end{bmatrix} \cdots (8)$$

とすると, 角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_P$ は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_P &= \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} + C_2(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{SY} \end{bmatrix} + C_2(\phi)C_3(\theta_{SY}) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{SR} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta_{SY} & -\sin \phi & 0 \\ -\sin \theta_{SY} & 0 & 1 \\ \sin \phi \cos \theta_{SY} & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{SR} \\ \dot{\theta}_{SY} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \\ &= G_S(\theta_S) \dot{\theta}_S \cdots (9) \end{aligned}$$

となる。ここで PTP の P 系ロール軸回りの回転変位はアーム先端並進変位にほとんど影響を及ぼさないの

Fig. 4 Definition of parameter ϕ

で P 系ピッチ軸, ヨー軸回りの角速度係数である行列 G_s の第 2, 3 行めより特異点が求められる。

$$\begin{bmatrix} -\sin \theta_{SY} & 0 & 1 \\ \sin \phi \cos \theta_{SY} & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} = A \cdots \cdots (10)$$

とし, 7 関節逆運動学を解く際に用いる擬似逆行列より

$$\det(AA^T) = 0$$

となるとき 7 関節特異点となる。

$$\det(AA^T) = \sin^2 \theta_{SY} \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cos^2 \theta_{SY} + \cos^2 \phi \cdots \cdots (11)$$

より,

$$\cos \theta_{SY} = 0 \quad \text{and} \quad \cos \phi = 0$$

よって, 並進に関する 7 関節特異点は

$$\theta_{SY} = \pm \frac{\pi}{2} \quad \text{and} \quad \phi = \pm \frac{\pi}{2}$$

となる。さらに, SR 固定 6 関節特異点, SY 固定 6 関節特異点は A 行列の第 1 列, 第 2 列をそれぞれ無視し行列式が零となる解を求めれば, SR 固定 6 関節特異点は

$$\phi = \pm \frac{\pi}{2}$$

SY 固定 6 関節特異点は

$$\theta_{SY} = \pm \frac{\pi}{2} \quad \text{or} \quad \phi = 0, \pm \pi$$

となる。以上より 7 関節特異点は SR 固定, SY 固定, 6 関節特異点の論理積となっていることがわかる。

3.2 PTP 挙動特性解析 SSRMS の運用において周囲との干渉を注意しなければならないのはピッチ面の変化(PPC: Pitch Plane Change)が起きた場合である。PPC とはピッチ面がロール軸, ヨー軸回りに回転することと等価である。そこで 3.2 節では P 系の角速度ベクトル ω_P のロール軸, ヨー軸成分の挙動特性を明らかにする。

P 系の角速度ベクトル ω_P を表す式(9)より, 係数行列の行列式は

$$\det[G_s(\theta_s)] = -\cos \theta_{SY} \cdots \cdots (12)$$

よって,

$$\theta_{SY} = \pm \frac{\pi}{2}$$

の場合特異点となる。これを式(9)に代入すると

$$\omega_P = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \phi & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{SR} \\ \dot{\theta}_{SY} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \cdots \cdots (13)$$

より,

$$\phi = 0, \pm \pi \quad \text{のとき} \quad \omega_{P1} = 0$$

$$\phi = \pm \frac{\pi}{2} \quad \text{のとき} \quad \omega_{P3} = 0$$

となり, それぞれ P 系ロール軸, ヨー軸の自由度が失

われる。

周囲との干渉を注意する上で, PPC の中で最も重要な挙動は, アーム先端並進変位に影響がほとんど現れない P 系ロール軸回りの回転である。そこで, SR 固定 6 関節運用, SY 固定 6 関節運用時の P 系ロール軸回りの回転に関する PTP 挙動特性を示す。

SR 固定 6 関節運用, SY 固定 6 関節運用時の PTP ロール軸回転挙動特性は式(9)の係数行列の第 1 行めによって表される。SR 固定 6 関節運用では

$$\omega_{P \text{ roll}} = -\sin \phi \cdot \dot{\theta}_{SY} \cdots \cdots (14)$$

より

$$\phi = 0, \pm \pi$$

のとき係数が最大となり, PTP が P 系ロール軸回りに大きく回転してしまうことを意味する。同様に SY 固定 6 関節運用では

$$\omega_{P \text{ roll}} = \cos \phi \cos \theta_{SY} \cdot \dot{\theta}_{SR} \cdots \cdots (15)$$

より

$$\phi = 0, \pm \pi \quad \text{and} \quad \theta_{SY} = 0, \pm \pi$$

のとき PTP が P 系ロール軸回りに大きく回転する。

以上において式(6)で定義した PTP 角 ϕ および θ_{SY} は特異点だけでなくアーム全体のコンフィギュレーション変化を示す重要なパラメータであることを示した。

4. 運用状況の評価

4.1 評価指標の定義 SSRMS の挙動を評価するため, 以下 3 種類の評価指標を定義する。

(1) 評価指標 1: ヤコビアン評価

アームの特異状態を把握するため, 特異点からの一種の距離を示す指標として可操作度を用いる。この評価指標は吉川⁽⁴⁾が提案した特異点の一種の距離を示す指標である可操作度と同様である。ここで, アームの運用状態にならない 3 種類の可操作度を定義する。

7 関節可動可操作度

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J[\dot{\theta}_{SR} \quad \dot{\theta}_{SY} \quad \dot{\theta}_{SP} \quad \dot{\theta}_{EP} \quad \dot{\theta}_{WP} \quad \dot{\theta}_{WY} \quad \dot{\theta}_{WR}]^T \\ \omega &= \sqrt{\det JJ^T} \end{aligned} \cdots \cdots (16)$$

SR 関節固定 6 関節可操作度

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J_{\text{roll}}[\dot{\theta}_{SY} \quad \dot{\theta}_{SP} \quad \dot{\theta}_{EP} \quad \dot{\theta}_{WP} \quad \dot{\theta}_{WY} \quad \dot{\theta}_{WR}]^T \\ \omega_{\text{roll}} &= |\det(J_{\text{roll}})| \end{aligned} \cdots \cdots (17)$$

SY 関節固定 6 関節可操作度

$$\begin{aligned} \dot{X} &= J_{\text{yaw}}[\dot{\theta}_{SR} \quad \dot{\theta}_{SP} \quad \dot{\theta}_{EP} \quad \dot{\theta}_{WP} \quad \dot{\theta}_{WY} \quad \dot{\theta}_{WR}]^T \\ \omega_{\text{yaw}} &= |\det(J_{\text{yaw}})| \end{aligned} \cdots \cdots (18)$$

Table 1 Joint-angles of an example of arm operation

	Before Shoulder Yaw Release	Before Shoulder Yaw Release	At Shoulder Yaw Release	During Shoulder Yaw Release	After Shoulder Yaw Release
Joint	Pos. #0	Pos. #1	Pos. #2	Pos. #3	Pos. #4
SR (deg)	-73.3	-140.1	-149.0	-155.8	-160.0
SY (deg)	49.0	49.0	49.0	46.4	42.7
SP (deg)	-39.9	-134.65	-141.52	-144.4	-143.8
EP (deg)	-118.5	-67.0	-65.6	-64.7	-67.0
WP (deg)	-63.4	-128.3	-128.9	-131.8	-133.0
WY (deg)	28.9	-3.4	-0.6	3.27	7.45
WR (deg)	-46.0	-91.1	-83.4	-71.1	-59.6

(2) 評価指標 2: エルボ変動評価

アーム先端を操作したときのエルボ部の変動を評価するため、リスト部の微小変位ベクトルのノルムに対するエルボ部の微小変位ベクトルのノルム。

$$EW = \frac{\|\delta \mathbf{R}_{\text{elbow}}\|}{\|\delta \mathbf{R}_{\text{wrist}}\|} \dots\dots\dots (19)$$

$\mathbf{R}_{\text{elbow}}$, $\mathbf{R}_{\text{wrist}}$ は A 0 系から見たエルボ, リスト部の位置ベクトルである。

(3) 評価指標 3: ピッチ面挙動評価

ピッチ面を示す PTP の挙動を評価するため, 式 (8), (9) で示した P 系の角速度ベクトル ω_P を離散化する。

$$\omega_P(i) = \begin{bmatrix} \cos \phi(i) \cos \theta_{SY}(i) & -\sin \phi(i) & 0 \\ -\sin \theta_{SY}(i) & 0 & 1 \\ \sin \phi(i) \cos \theta_{SY}(i) & \cos \phi(i) & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_{SR}(i) - \theta_{SR}(i-1) \\ \theta_{SY}(i) - \theta_{SY}(i-1) \\ \phi(i) - \phi(i-1) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

評価指標 2, 3 は新たに提案するアーム全体のコンフィギュレーション変化の度合いを示す指標である。指標 2 はロボット運用の際, 周囲の構造物との接触を避ける上で最も注意しなければならないエルボ部の位置変化を評価することでアーム全体のコンフィギュレーション変化の度合いを示す大まかな指標となっている。指標 3 は PTP の姿勢変化を評価することでより詳細なアーム全体のコンフィギュレーション変化を示す指標となっている。

4.2 運用経路の評価例 4.2 節においては, ISS で用いられている SSRMS, SPD, ERA の 7 関節ロボットアームの自由度配置を取り上げる。また, 運用経路は代表的経路例として 2001 年 7 月の STS-104 ミッション時に米国エアロック付近での船外活動との協調作業による酸素タンク取付作業後, SSRMS を米

Fig. 5 An example of arm operation

国実験棟上の格納位置へ移動する際に使用された経路を用いた。同経路の概要および主要点における各関節角を図 5, 表 1 に示し, 4.1 節で定義した評価指標を適用し評価を行う。操作モードは SY Held-Mode である。Pos.# 3, 4 間で SY 固定 6 関節特異点のため 7 関節可動となっている。

Pos.# 0, Pos.# 2, Pos.# 4 における各可操作度, Pos.# 1-4 における PTP 挙動評価関数値を表 2, 3 に示す。

上記運用経路を巨視的視点から評価するため, 4.1 節で定義した 3 種の可操作度 w の ϕ - θ_{SY} 平面における等高線を図 6 に示す。また PTP 挙動特性を示す角速度についても同様に, SR 固定/SY 固定 6 関節運用時の PTP の P 系ロール軸角速度を図 7 に示す。すなわち式 (18) の係数行列の (1, 1) 成分と (2, 2) 成分を計算した結果を図 7(a), (b) に, さらに P 系ヨー軸角速度についても示すため, 式 (18) の係数行列の (3, 1) (3, 2) 成分を図 7(c), (d) に示す。また, 図 6, 7 のそれぞれに表 2, 3 に示した運用経路を記入する。図 7 における可操作度 w は大きいことが望ましいが, 図 7

における ω_p は PTP の回転速度を示すものであるため、小さい値であることが望ましい。

表 2, 図 6 の同運用経路例では Pos.#0 では SY 固定の w_{Yaw} が SR 固定の w_{Roll} より大きな値を示し、逆に Pos.#4 では SR 固定の w_{Roll} が SY 固定の w_{Yaw} より大きな値を示していることが確認できる。また、表 3 より Pos.#1 と Pos.#2 間の EW が Pos.#2 と Pos.#3 間や Pos.#3 と Pos.#4 間よりはるかに大きな値を示していることがわかる。この現象は、SY 関節の固定運用時の Pos.#1 と Pos.#2 間では、アーム先端並進変位にはほとんど影響を及ぼさない PTP ロール軸回転が大きく起こっていたためである。SY 関節固定をはずし 7 関節可動とした Pos.#2, Pos.#3, Pos.#4 間では PTP 回転が大きく起こらなかったため EW も小さな値を示している。

図 7 より Pos.#0 では SY 関節固定運用のほうが SR 関節固定運用より PTP ロール軸回転が起こりにくい、ヨー軸回転が起こりやすく、EW は大きくならないと考えられる。逆に Pos.#1-4 では SY 関節固

定運用の場合 PTP ロール軸回転が大きくなるため EW も大きくなると考えられる。このようにアーム先端を操作した際のエルボ部の変化量を示す EW が大きな値を示す状況では、アーム全体のコンフィギュレーション変化を意識していないオペレータは自身の意図するアームの動きに反して突如暴走したように錯覚することさえある。

以上をまとめると、アーム先端のみの評価指標(可操作度)はエルボを含むアーム全体のコンフィギュレーション変化を評価することができないが、提案する評価指標を用いることで、オペレータがアーム先端の操作に集中していても、アーム全体の急激なコンフィギュレーション変化を警告する情報を得ることが可能となる。

5. 操縦支援ディスプレイ

宇宙空間でのロボットアーム運用においてアームやペイロードと周囲の構造物との接触は必ず避けなくてはならず、障害物回避のための遠隔操作支援システムに関する研究は過去いろいろなされている。実運用により有効性が示された代表的なものとして 1993 年ドイツがシャトル内で行ったロボット実験 POTEX⁽⁵⁾、1997 年 11 月に宇宙開発事業団によって行われた技術試験衛星 VII 型によるロボットアーム操作実験⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾において用いられた操作支援システムがある。それらは通信時間遅延がある環境で安全かつ操作性の向上を目的とし、アームや環境情報を静的もしくは動的にシミュレートして運動予測結果を TV 画面に表示する。また、内山らは指令入力に対してアームの挙動を極めて敏感になる特異点近傍において、手先の指令速度方向を正確に追従できる手法⁽¹⁰⁾を提案しているが、その際に起こるアーム全体のコンフィギュレーション変

Table 2 Manipulability

	Pos. #0	Pos. #2	Pos. #4
w	228.3392	743.4717	758.0435
w_{Roll}	28.5726	514.3815	516.6911
w_{Yaw}	150.6031	32.7451	17.1996

Table 3 PTP motion

	Pos. #1	Pos. #2	Pos. #3	Pos. #4
EW	1.8583	0.7262	0.7416	
$\ \delta R_{wrist}\ $	0.2140	0.8591	0.9191	
ω_p	-0.0913 -0.2132 -0.0091	-0.0852 -0.1294 -0.0506	-0.0544 -0.0575 -0.0673

(a) 7 joints movable case

(b) SR-fixed 6 joints movable case

(c) SY-fixed 6 joints movable case

Fig. 6 Evaluations of manipulability

Fig. 7 PTP rotation factors

Fig. 8 Orthogonal oriented vector of PTP

化に関する情報を効果的に提示する手法の提案には至っていない。本報ではアーム全体のコンフィギュレーション変化をオペレータが予測するのが難しく、これによる障害物への衝突可能性を低減させるため予測ディスプレイの導入を提案する。

一般に特異点近傍におけるアームリンクの運動は複雑であるうえに、7関節アームであるSSRMSはその操作モードによってアームコンフィギュレーション変化が大きく違うためオペレータが瞬時に判断するのは

Fig. 9 CG display of predictor PTP

困難となっている。しかし、現在オペレータへ与えられる周囲構造物に対するアームのクリアランスに関する情報はテレビ映像のみである。したがって、コンフィギュレーション変化の判断やオペレータが変化に注意しなければならない状況であることを知らせる必要がある。

提案する操縦支援ディスプレイは、4・1節で述べた評価指標を応用し、アームコンフィギュレーションの変化を示す情報をオペレータへ与えるものである。とくに、EWがアーム全体のコンフィギュレーション変化を検知する情報として重要なパラメータとなることを示した。したがって、オペレータがコンフィギュレーション変化に注意しなければならない状況であることをEWの数値データによって知らせ、この値がある一定値を超えた場合に警告を与える。さらに各操作モードにおけるコンフィギュレーション変化をあらかじめ知らせるために、図8に示すPTP直交ベクトル(ここでは $+z$ 方向)を入力した場合におけるPTPを予測画面として図9に示すようにCG画面にオーバーレイさせる。ここで、図8は、正負それぞれのPTP直交ベクトルを手先の指令座標系における xyz 成分に分割してカラー表示することができる。なお、提案する操縦支援ディスプレイの詳細および運用性の検証は別途報告する予定である。

6. お わ り に

スペースシャトルやISSの有人宇宙ロボティクスの運用においては、アームやその把持するペイロードと周囲の構造との接触は安全やミッション達成に対して致命的な影響を与えかねない。SRMSやSSRMSなどの現時点での有人宇宙ロボティクスにおいて、運用中オペレータに与えられる情報は、テレビ映像などの視覚情報によるアーム全体のコンフィギュレーションや、アームおよび把持したペイロードと周囲とのクリアランス、さらにFORおよび各関節角の数値データ等である。

本研究ではアーム全体のコンフィギュレーションの変化を検知する情報として、アーム先端を操作した際、リスト部の微小変位ベクトルのノルムに対するエルボ部の微小変位ベクトルのノルムEWが重要なパラメータであることを明らかにした。さらにこのEWの

情報は、アーム全体のリアルタイム映像にPTPのPredictorとして重ね合わせる形式で表示することが、人間機械系インタフェースの観点からも望ましいと考えられる。PPCに関する情報であるEWの値をオペレータに提示することは、周囲構造に対するアームや把持したペイロードとのクリアランスの変化の把握を促し、7関節特有の冗長性を生かした運用においても安全およびミッション達成に大きく寄与すると考えられる。

文 献

- (1) Landzettel, K., Brunner, B., Schreiber, G., Steinmetz, B. M. and Dupuis, E., MSS Ground Control Demo with MARCO, *i-SAIRAS 2001*, (2001), Montreal, Canada.
- (2) Dupuis, E., Piedboeuf, J.-C., Gillett, R., Landzettel, K. and Brunner, B., A TEST-BED FOR THE DEMONSTRATION OF MSS GROUND CONTROL, *ASTRA 2000*, (2000), ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- (3) Lapointe, J.-F. and Boulanger, P., Live Virtual Reality System for the Control and Monitoring of Space Operations, *i-SAIRAS 2001*, (2001), Montreal, Canada.
- (4) Yoshikawa, T. (Brady, M. and Paul, R. 編), Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy, Robotics Research, *The First International Symposium*, (1984), 735-747, MIT Press, Cambridge, Mass.
- (5) Hirzinger, G., ほか5名, The Sensory and Telerobotic Aspects of the Space Robot Technology Experiment ROTEX, *Proc. of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, (1992), 83-110, Toulouse, France.
- (6) 宇宙開発事業団, 技術試験衛星VII型(ETS-VII)のミッション概要, 宇宙開発事業団技術報告(NASDA-TMR-970002), (1997).
- (7) 小田光茂, 特集, ETS-VIIにおける宇宙ロボット実験, 日本ロボット学会誌, **17-8** (1999), 1055-1061.
- (8) 小田光茂, ETS-VIIロボット実験, 計測と制御, **38-11** (1999), 704-709.
- (9) 若田光一, ETS-VII搭載ロボット遠隔操作実験と有人宇宙ロボティクス, 日本ロボット学会誌, **17-8** (1999), 44-49.
- (10) 妻木勇一・小寺真司, D. N. ネンチェフ・内山勝, 6自由度マニピュレータの特異点適合遠隔操作, 日本ロボット学会誌, **16-2** (1998), 195-204.