研究論文

全方位映像とロボット3D表現を用いた油圧駆動型6脚ロボットCOMET-IVの遠隔操縦*

大録 洋志**, 野波 健蔵**

Omni-Directional Vision and 3D Robot Animation Based Teleoperation of
Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET-IV

Hiroshi OHROKU, Kenzo NONAMI

Recently, the use of robots has been increasing into various fields, and is not only for industrial use. The expectations of using robots for support operations in disaster areas are increasing, to avoid the danger of secondary disasters that might occur. We are developing a hydraulically actuated hexapod robot COMET-IV, which aims to support a variety of activities in dangerous environments where humans cannot go. Currently, it is very difficult to implement fully autonomous robots in stricken areas. For this reason, teleoperational control of robots is an indispensable technology to be introduced. We believe that the performance of the teleoperation could be improved if it were possible for the operator to observe the robot conditions and surroundings in real time on a computer screen. We have proposed a teleoperation system that applies an omni-directional vision sensor and real time 3D animation of robots. Obstacle avoidance walking experiments conducted in an outdoor environment have indicated the effectiveness of the proposed system.

Key words : Tele-Robotics, Hydraulic System, Legged Locomotion, Virtual Reality, Mechatronics

1. 緒 言

これまで著者の一人は世界的な緊急課題である人道的地雷探知除去活動に対して6脚歩行ロボットによる地雷探知を提案し、地雷探知ロボットCOMETの研究開発を行ってきた¹⁾。現在、著者らは地雷探知のみならず、災害現場での救助支援や火口の観測調査、山林や河川敷での運搬作業など人間が進入することが困難な環境における様々な作業支援を目的とする油圧駆動型6脚ロボットCOMET-IV (図1)の研究開発を行っている²⁾。

被災地など2次的災害が発生しうる環境では、ロボットを完全に自律させることが現状では困難である。高度な判断を人間が行い、遠隔地にあるロボットの行動を制御する遠隔操縦は重要な技術の1つであると考えられている。遠隔操縦システムは、極限環境などを中心に数多くの研究がなされている。あらかじめ用意された基本動作を選択実行する方式³⁾やHMD (Head Mounted Display) を用いて臨場感を出し、マスタスレーブ方式での遠隔操縦の研究⁴⁾などがある。また、文献⁵⁾では全方位デジタルカメラを搭載し、レーザ距離計のデータとSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を用いてリアルタイムに生

Fig. 1 Overview of COMET-IV

成された環境地図情報を操縦者へ提示することで車輪型移動ロボットの遠隔操縦を実現させている。SLAMはロボットの位置と環境地図を同時に推定する技術であり、文献^{6), 7)}ではその手法を提案している。遠隔操縦の移動体として車輪型⁵⁾やクローラ型⁸⁾を用いた研究事例はあるが、大型の脚型移動ロボットにおける操縦者への操作アシストを実現した研究事例⁹⁾は少ない。本論文はこの点に着目し、大型脚型移動ロボットのテレオペレーションについて論じている。脚型移動ロボットは不整地歩行においてロボット胴体高さ・姿勢の変動および脚運動の変化などが挙げられ、操縦者はロボットの周囲実環境と合わせて様々な視点からロボットの動作状態を把握しながら操縦を行う必要があり、

*平成21年6月18日 原稿受付

**千葉大学大学院工学研究科

(所在地 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

(E-mail: hiroshi.ooroku@graduate.chiba-u.jp)

Table 1 Specifications of COMET-IV

Item	Value
Height [m]	2.8
Width [m]	3.3
Length [m]	2.5
Weight [kg]	2120
Pump pressure [MPa]	22 (1 Unit)
Pump rated flow [L/min]	78 (1 Unit)

Table 2 Link parameters

Joint	Link	Length [m]	Range [deg]
Shoulder	L1	0.00	$-120^\circ \leq \theta_1 \leq 60^\circ$ (Leg1-3)
	L2		$-60^\circ \leq \theta_1 \leq 120^\circ$ (Leg4-6)
Thigh	L2	1.13	$53^\circ \leq \theta_2 \leq 131^\circ$
Shank	L3	0.77	$35^\circ \leq \theta_3 \leq 144^\circ$
Foot	L4	0.39	$-56^\circ \leq \theta_4 \leq 108^\circ$

Fig. 2 System configuration of COMET-IV

Fig. 3 Coordinate system of leg

従来の車輪型やクローラ型のテレオペレーションと本質的に異なる。したがって、ロボット周囲実環境および動作状態を操縦者へ提示した遠隔操縦支援システムは不可欠である。

そこで著者らは、一度に周囲360度の画像を取得することができる全方位視覚センサ映像の提示、ロボット搭載の各種センサ情報を用いてロボットの移動状態を仮想的な3D空間で表現する事により、操縦者用遠隔操縦アシストシステムを実現した。屋外環境での作業支援を目的としたCOMET-IVのような大型脚型ロボットで全方位視覚センサとロボット3D表現を操作アシスト情報として提示した遠隔操縦システムの研究報告例は著者の知る限りない。本論文ではまず油圧制御システムの基本構成と全方向歩容アルゴリズムについて述べ、開発した遠隔操縦支援システムの構成と全方位画像変換、センサ情報を用いた仮想空間でのロボット3D表現について述べる。最後に、屋外環境での障害物回避実験の結果から本システムの有効性を示す。

2. システム構成

油圧駆動型6脚歩行ロボットCOMET-IVの主な仕様を表1に示し、全体のシステム構成を図2に示す。動力源として汎用ガソリンエンジンを2基搭載し、エンジンにより得られた動力で油圧ポンプを駆動させる。油圧系は、Leg 1, 2, 3とLeg 4, 5, 6の2系統で構成される。各脚機構は油圧モータで駆動するShoulder（肩部）、油圧シリンダで駆動するThigh（もも部）・Shank（すね部）・Foot（足先部）の4自由度を有す。脚リンクパラメータを表2に示す。

遠隔操縦に基づくロボット歩行制御の流れを説明する。まず操縦者は遠隔操縦支援システムを介し、Locomotion Computerへ歩容パラメータを含めた歩行動作の指示情報を送信する。Locomotion Computerでは受信した指示情報に基づき各足先の目標軌道を生成する。ポテンショメータからの各関節回転角度をフィードバックし、制御演算にて制御電圧を算出する。生成された制御電圧はD/A変換器を介して出力され、バルブ・コントローラにて増幅された制御電流は比例電磁弁のスプールを変位させ、各アクチュエータを駆動させる。

3. 全方位歩容アルゴリズムの適用

本論文では水平方向の足先軌道生成に広瀬らが提案した基準旋回歩容¹⁰⁾、垂直方向の足先軌道には榊原らによって提案された低衝撃足先軌道¹¹⁾を適用した。歩行パターンは6脚ロボットの静歩行の中で最も速度を出せる3脚支持歩行とした。3脚支持歩行とは、3脚ずつ二組に分けられた脚（Leg 1, 3, 5とLeg 2, 4, 6）が支持脚相と遊脚相を交互に切替える歩容である。ロボットの歩行周期は支持脚相・遊脚相のセットで1周期とする。水平方向足先軌道の導出に用いるパラメータを表3に定義し、図4に示す。

歩行1周期中の胴体中心の旋回角度は、各脚の可動範囲を考慮する必要がある。図5に胴体下面の高さが0.65mのときの水平方向の可動範囲を示す。各足先を中心とし破線で示した領域は、全方向歩容時における足先の安全可動領

Fig. 4 Definition of coordinate systems of the omni-directional gait

Table 3 Parameters of the omni-directional gait

Symbol	Signification [Coordinate system]
O_c	Body coordinate system
$O_{s,i}$	Shoulder coordinate system
O_t	Rotation center coordinate system
(R_{ct}, θ_{ct})	Position of a rotation center [polar display of O_c]
θ_{ib}	Traverse angle of the body center at one cycle [O_t]
$(R_{tf,i}, \theta_{tf,i}(t))$	Position of each foot [polar display of O_t]
$(X_{tf,i}(t), Y_{tf,i}(t))$	Position of each foot [O_t]
$(x_{cs,i}, y_{cs,i})$	Position of each shoulder [O_c]
$(x_{ts,i}, y_{ts,i})$	Position of each shoulder [O_t]
$(x_{sfo,i}, y_{sfo,i})$	Initial position of each foot [$O_{s,i}$]
$(x_{sfc,i}, y_{sfc,i})$	Center of each foot trajectory at one cycle [$O_{s,i}$]
$(X_{tf,i}(t), Y_{tf,i}(t))$	Trajectory of each foot [$O_{s,i}$]
T	Cycle Time
α	Crab angle

Fig. 5 Horizontal workspace of all legs

域である。歩容パラメータの設定および切替えを効率的に行うために、この安全可動領域は円形としており、直径を d_L とする。この安全可動領域で歩行を行うときロボットの胴体中心が歩行1周期中に移動する領域は、胴体中心まわりに破線で示すように半径 $r_b = 2d_L$ の円となり、歩行1周期中の胴体中心の巡回角度 θ_{ib} は以下の式を満たすように設定する。

$$R_{ct} \sqrt{2(1 - \cos \theta_{ib})} \leq r_b \quad (1)$$

巡回中心 (R_{ct}, θ_{ct}) を任意にとり、歩行1周期中の胴体中心の巡回角度 θ_{ib} が式(1)を満たすように設定することで、水平方向足先軌道が導出される。なお、任意の側行角 α での歩行は式(2)のように設定し、 R_{ct} を極大とすることで実現可能である。COMET-IVの詳細な足先軌道生成は文献¹²⁾を参照されたい。

$$\theta_{ct} = \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

4. 遠隔操縦支援システム

遠隔地にて操縦者がロボットの次の行動や指示を決定するために現状のロボット周囲環境や動作状態を把握する必要がある。著者らは全方向歩行可能なCOMET-IVにとって一度に周囲360度の画像を取得することができる全方位視覚センサは有用であると考えた。さらに、ロボット搭載の各種センサ情報を用いて仮想的な3D空間でロボットの動作状態を即座に表現する事により、脚型ロボットの遠隔操縦性を向上させると考えた。そこで著者らは遠隔地からの操縦者によるロボット操縦を実現するための遠隔操縦支援システムの開発を行った。図6に開発したシステムの画面を示し、図7に本システムで用いている周辺機器を示す。全方位視覚センサは、ビデオカメラと全方位ミラーで構成されている。また操縦者の遠隔操縦デバイスとしてジョイスティックを採用している。本システムの画面機能を以下に示す。

- [1] 指示情報の提示
- [2] コミュニケーションログ
- [3] ロボット周囲実環境画像
- [4] 受信センサデータの提示
- [5] マップ情報
- [6] 仮想3D空間でのロボット動作表現

4.1 遠隔操縦指示情報

歩容パラメータを含むオペレータ指示情報は、無線LANネットワークを介し、Locomotion Computerへ送られる。本論文ではデータ転送方式としてUDP (User Datagram Protocol) ソケット通信を用いている。表4に指示情報の一覧を示す。Actionは立脚・座位・歩行開始停止の動作指示パラメータである。Cycle_Timeは歩行1周期の時間を表す。 θ_{ib} は1周期中の胴体中心の巡回角度であり、 R_{ct} および

Fig. 6 View of teleoperation assistant system

(a) Omni-directional camera

(b) Joystick

Fig. 7 Peripheral device

Table 4 Instruction information list

Parameter	Signification
Action	Action value
Cycle_Time	Cycle time
θ_b	Traverse angle of the body center at one cycle [O_c]
R_{ct}	Position of a rotation center
θ_{ct}	[polar display of O_c]

Fig. 8 Coordinate system of joystick

θ_{ct} は旋回中心位置の極座標である。

著者らは遠隔操縦デバイスとしてジョイスティックを用いており、ジョイスティックの傾き・回転から歩容パラメータを導出している。ジョイスティックの座標およびパラメータを図8-(a)に示し、基準歩行座標を図8-(b)に示す。基準歩行角度はジョイスティックから8方向選択可能である。 α は任意の側行角、 β は基準歩行角を表す。 rot_z は1周期中の胴体中心旋回角度を導出の際に用いており、以下のように旋回角度範囲を設定している。

$$\begin{aligned} -10^\circ \leq \theta_b \leq -0.125^\circ \\ 0.125^\circ \leq \theta_b \leq 10^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

任意側行角での歩行指示では θ_b を極小、 R_{ct} を極大とし、 θ_{ct} は式(4)を用いて導出する。

$$\theta_{ct} = \alpha + \beta + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

旋回歩行指示では rot_z から算出された値を1周期中の胴体中心旋回角度 θ_b とし、式(5)を用い R_{ct} を算出する。ただし、ここでは半径 $r_b = 1$ の円としている。 θ_{ct} は式(6)を用いる。

$$R_{ct} = \frac{1}{\sqrt{2(1 - \cos \theta_b)}} \quad (5)$$

$$\theta_{ct} = \alpha + \beta + \gamma \quad (6)$$

ただし、 γ は以下のように定義する。

$$\begin{aligned} -10^\circ \leq \theta_b \leq -0.125^\circ \text{ のとき } \gamma &= -\frac{\pi}{2} \\ 0.125^\circ \leq \theta_b \leq 10^\circ \text{ のとき } \gamma &= \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

以上のように全方向歩容パラメータを決定することができ、基準歩行角を変更しても、ジョイスティックでの操縦性は保たれる。

4.2 全方位画像を用いた周囲環境画像の提示

ロボット周囲実環境を操縦者へ情報提示する機能は遠隔操縦システムにおいて重要な機能の一つである。ロボットの周囲環境を広範囲に取得するためには、回転ステージに取り付けられたカメラを利用するのが一般的であるが、この方法では機械的な遅延が生じてしまう。山澤ら¹³⁾は全方位視覚センサより全方位画像を取得・伝送し、その入力画像より操縦者の視線方向の平面透視投影画像を生成する手法を提案している。またGeyerら¹⁴⁾は全方位ミラーなどの反射屈折光学系における投影の幾何学的解析を行っている。本論文ではこれらの文献を参考に全方位画像から平面透視投影画像を生成している。

本システムで使用している全方位視覚センサのミラーパラメータを表5に示す。全方位視覚センサは図9のように下向きに設置した双曲面ミラーに写りこんだ鏡像を上向きに設置したビデオカメラで撮影するものである。本システムへロボット周囲環境映像が提示されるまでの流れを説明する。まずNavigation ComputerはIEEE1394で接続されている全方位視覚センサからビデオストリームを取得する。ビデオストリームは無線LANを経由し、Teleoperation Computerへ送信される。本論文では、ビデオカメラ信号の受信・変換、データ伝送においてビデオ会議システムなどで利用されているDVTS (Digital Video Transfer System)¹⁵⁾を用いている。Teleoperation Computer内で受信された全方位画像フレームデータを入力画像とし、平面透視投影変換を行う。ここでは、ミラー中心軸とカメラの光軸が一致しているものと仮定する。まずパン角 pan 、チルト角 $tilt$ 、

Table 5 Parameters of hyperbolic mirror

a	26.2 [mm]
b	35.4 [mm]
c	44.1 [mm]
Diameter of mirror	55.0 [mm]
Angle of elevation	15.0 [deg]
Angle of depression	50.0 [deg]

Fig. 9 Configuration of omni-directional vision sensor

焦点距離 f にあるスクリーンP上の座標 (x_i, y_i) から球面座標を求める。ただしパン角・チルト角いずれも0度の方向をX軸とし、投影中心原点を $(0, 0)$ とする。

$$\begin{aligned}\phi &= -pan \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \\ \theta &= -tilt \times \left(\frac{\pi}{180}\right)\end{aligned}\quad (7)$$

球面に対して平面投影面がどの方向にあるかパン角・チルト角・焦点距離で与え球面座標を求める。

$$\begin{pmatrix} vx_i \\ vy_i \\ vz_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \theta & \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi & \sin \phi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ -x_i \\ -y_i \end{pmatrix}\quad (8)$$

$$r_i = \sqrt{vx_i^2 + vy_i^2 + vz_i^2}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\phi_{s,i} &= \arctan\left(\frac{vy_i}{vx_i}\right) \\ \theta_{s,i} &= \arctan\left(\frac{vz_i}{r_i}\right)\end{aligned}\quad (10)$$

式(7)~(10)にて球面座標変換をして得られた $\phi_{s,i}$ と $\theta_{s,i}$ を用いて直交座標系に変換する。

$$\begin{aligned}x_{s,i} &= \cos \phi_{s,i} \sin \theta_{s,i} \\ y_{s,i} &= \sin \phi_{s,i} \sin \theta_{s,i} \\ z_{s,i} &= \cos \phi_{s,i}\end{aligned}\quad (11)$$

ミラーパラメータである a を軌道長半径、 b を軌道短半径としたとき、半通径は式(12)で求められる。

$$\lambda = \frac{b^2}{a}\quad (12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2}}\quad (13)$$

式(12)で得られた半通径と式(13)で得られた離心率を用い、球面投影に用いられる距離パラメータ l, m を導出する。ただし、 $\mu = -20 \times c$ とする。

$$l = \frac{2\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}\quad (14)$$

$$m = \frac{\mu - \varepsilon(\varepsilon\mu + 2\lambda - 2)}{1 + \varepsilon^2}\quad (15)$$

$$s = \frac{m - l}{z - l}\quad (16)$$

以上から双曲鏡の投影座標を算出する。

$$\begin{aligned}hx_i &= s \times x_{s,i} \\ hy_i &= s \times y_{s,i}\end{aligned}\quad (17)$$

最後に式(18)の変換行列Kを用いて理想的なカメラ座標系とピクセル座標系との変換を行い、式(19)にて画像の左上を原点とした全方位画像中の投影座標を得ることができる。変換行列Kにおける358.6, 215.1の値は全方位画像内での中心座標XY値である。

$$K = \begin{pmatrix} 884.5 & 0 & 358.6 \\ 0 & 788.4 & 215.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} px_i \\ py_i \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} hx_i \\ hy_i \\ 1 \end{pmatrix}\quad (19)$$

上述のような流れで再投影画像を生成することが可能であるが、この方法では再投影する画像内のすべてのピクセルに対して同様の計算を行うため、処理時間が過大になってしまい、結果的にスクリーンへの映像の描画に遅延が生じてしまう。そこで著者らは文献¹⁶⁾を参考に再投影する画像に対し格子を設け、各格子点に対する計算処理を行い、各格子点と計算結果で得られた対応点をテクスチャマッピングすることで処理の高速化を図った。文献¹⁶⁾では、テクスチャマッピングを用いた全方位画像からの擬似平面透視投影画像を生成における処理時間を計測し、格子数と画像提示時間遅延を評価している。

まず、図10-(a)に示すような生成画像に対し、格子点を設ける。ここでは格子数が1の場合での説明とする。設けた格子点に対して、式(7)~(19)を用いて、全方位画像中の対応点を算出する。得られた対応点をテクスチャ座標系(図10-(c))に変換する。次に各格子点を図10-(b)に示す座標系へ座標変換する。各格子点と算出された点を正確に対応させ、テクスチャマッピングを行うことにより、少ない計算量で全方位画像から平面透視投影画像を生成することができる。全方位画像と生成された平面透視投影画像を図11に示す。本論文では格子数1で述べたが、格子数を増やした

Fig. 10 Image of lattice points and calculated points

Fig. 11 Omni-directional image and generated image

計算を行うことで歪みの少ない画像を生成することが可能である。

4.3 仮想3D空間でのロボット動作表現

著者らは実際の設計図・実測値からロボットの3Dモデリングを行った。ロボットの動作表現のために使用されるセンサ情報はLocomotion Computerから無線シリアルモデムを介し、Teleoperation Computerへ随時送信される。シリアル側のデータ通信速度を57,600bpsとし、10Hzでの送信処理としている。

ロボット表現で用いるパラメータの一覧を表6、3D座標系を図12に示す。3D座標系のZ軸を真北とし、GPS座標系と一致させる。本システムではRTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) を用いている。初期化処理では方位角、GPS平面直角座標系でのXY値、胴体姿勢センサからのロール角・ピッチ角の初期設定を行い、ロボット全体を図13に示される磁気偏差角を含めた方位角でY軸回転させる。

初期化後、以下の流れで各パーツの動作を表現する。以下、各脚および胴体の同次変換行列を示す。

[1] 各脚 (足先部→すね部→もも部→肩部)

〈足先部〉

$$T_1 = \text{Trans}(-P_{\text{foot}_i}) \text{Rot}(\theta_1, Z) \text{Trans}(P_{\text{foot}_i}) \quad (20)$$

Fig. 12 Coordinate system of 3D robot

Fig. 13 Coordinate system of GPS

Table 6 Parameters of using in 3D Animation

Parameter	Signification
$\theta_{1,i}$	Angle of Shoulder [deg]
$\theta_{2,i}$	Angle of Thigh [deg]
$\theta_{3,i}$	Angle of Shank [deg]
$\theta_{4,i}$	Angle of Foot [deg]
λ	Body roll angle [deg]
ρ	Body pitch angle [deg]
ψ	Azimuth angle [deg]
GX	GPS X [m]
GY	GPS Y [m]
Δd	Magnetic variation [deg]
Parameters used by initialization	
ψ_{ini}	$\psi_{ini} = \psi$
GX_{ini}	$GX_{ini} = GX$
GY_{ini}	$GY_{ini} = GY$
Offset parameters	
ψ_{offset}	$\psi_{offset} = \psi - \psi_{ini}$
GX_{offset}	$GX_{offset} = GX - GX_{ini}$
GY_{offset}	$GY_{offset} = GY - GY_{ini}$
Each link position (XYZ) from the origin	
P_{sho_i}	Shoulder XYZ position
P_{th_i}	Thigh XYZ position
P_{sk_i}	Shank XYZ position
P_{foot_i}	Foot XYZ position

i : Leg No. (1 ~ 6)

〈すね部〉

$$T_2 = \text{Trans}(-P_{\text{sk}_i}) \text{Rot}(\theta_3 - 90, Z) \text{Trans}(P_{\text{sk}_i}) \quad (21)$$

〈もも部〉

$$T_3 = \text{Trans}(-P_{\text{th}_i}) \text{Rot}(\theta_2 - 90, Z) \text{Trans}(P_{\text{th}_i}) \quad (22)$$

〈肩部〉

$$T_4 = \text{Trans}(-P_{\text{sho}_i}) \text{Rot}(\theta_1, Y) \text{Trans}(P_{\text{sho}_i}) \quad (23)$$

[2] ロボット胴体

$$T_5 = \text{Rot}(\lambda, Z) \text{Rot}(\rho, X) \text{Rot}(\varphi_{\text{offset}}, Y) \quad (24)$$

$$T_6 = \text{Trans}(GY_{\text{offset}}, 0, GX_{\text{offset}}) \quad (25)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
Trans(xyz) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x & y & z & 1 \end{pmatrix} \\
Rot(\theta, X) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
Rot(\theta, Y) &= \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
Rot(\theta, Z) &= \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

以上、座標変換式(20)~(25)を用いて、ロボット全体の同次座標変換行列が示される。

$$T_{all} = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (26)$$

上述した座標変換を行うことにより、遠隔地におけるロボットの動作を表現させることができる。ロボットがどのような動作をしているのか即座に把握することができ、ロボットへの次の行動指示を決定する操縦者支援システムとなると考える。

5. 屋外環境での歩行実験

著者らは上述したシステムを用い、屋外における低度の不整地環境で歩行実験を行った。オペレータからは直接距離感覚がつかめない位置に障害物を二つ並べて配置し、本システムに提示される映像およびリアルタイムに更新されるロボットの 3D 画面を確認しながら障害物を回避する実験を行った。本実験では障害物とロボット間の距離は予め計測しておき、3D 画面上に仮想的な障害物オブジェクトを作成し理想的な環境を与えた。歩行制御系は PID による位置制御を用い、歩行 1 周期 16 [s] とし、側行歩容での歩行とした。なお、全方位画像変換に用いた格子数は 16×12 とし、画像を生成した。実験環境における磁気偏差角は 6° 50' であった。

図 14 に GPS により取得した実際の歩行軌道を示し、図 15 に Leg1 の足先軌道を示す。図 14 から二つの障害物を回避しながら歩行ができていることが分かる。図 16 に実験の様子を示し、図 17 に 3D 表現画像、図 18 に全方位画像および生成画像を示す。

操縦者は、提示された映像およびリアルタイムに更新される 3D 画面を確認しながら、遠隔地から COMET-IV を障害物回避動作させることができた。全方位視覚センサからの実環境映像とセンサ情報を用いた 3D ロボット表現の併用情報を操縦者へ提示することによりロボットの遠隔操縦の向上に繋がった。一方、画像データ転送用で用いている

ネットワークが高負荷状態となり Teleoperation Computer と Locomotion Computer 間のコミュニケーション通信に影響を及ぼすという課題点も残った。この課題については映像配信用とコミュニケーション用のネットワークを分離することで改善され则认为る。

Fig. 14 Experimental result of obstacle avoidance walking test

Fig. 15 Foot trajectory of walking test

Fig. 16 Photos of the obstacle avoidance walking test

Fig. 17 Images of 3D animation

Fig. 18 Omni-directional images and generated projection images

6. 結 言

本論文では全方位視覚センサからの映像とロボット動作を仮想3D空間でリアルタイムに表現した複合情報を提示する遠隔操縦支援システムについて述べ、歩行実験にて本システムの有効性を示した。今後はロボットの自己位置姿勢認識性能の向上を図ると共に、下位制御系への力制御の適用とLRFなどを用いた外界認識の高精度化を行うことで様々な不整地環境でも安定した歩行の実現を目指す。

参 考 文 献

- 1) K. Nonami, et al. : Development and Control of Mine Detection Robot COMET-II and COMET-III, JSME International Journal, Series C, **46**-3, 881/890 (2003)
- 2) M. Oku, H. Yang, G. Paio, Y. Harada, K. Adachi, R. Barai, S. Sakai, K. Nonami : Development of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET-IV —The 1st Report : System Design and Configuration—, Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics 2A2-G01 (2007)
- 3) T. Matsumoto, A. Konno, M. Uchiyama : Teleoperation of the small size Humanoid Robot HOAP-2, The Society of Instrument and Control Engineers The 213th research meeting, 213/219 (2003)
- 4) S. Tachi, K. Komoriya, K. Sawada, T. Itoko, K. Inoue : Telexistence Control Cockpit System for HRP, Journal of The Robotics Society of Japan, **19**-1, 16/27 (2001)
- 5) K. Saitoh, T. Machida, K. Kiyokawa, H. Takemura : A Mobile Robot Control Interface Using Omnidirectional Images and 3D Geometric Models, Technical report of IEICE, Multimedia and virtual environment **105**-256, 7/12 (2005)
- 6) S. Thrun, D. Fox, W. Burgard, and F. Dellaert : Robust monte carlo localization for mobile robots, Journal of Artificial Intelligence, **128**, 99/141 (2001)
- 7) Y. Chen and G. Medioni : Object modeling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing **10**-3, 145/155 (1992)
- 8) H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, S. Tsukui, H. Igarashi, F. Matsuno : Development of an unit type robot KOHGA 2 with stuck avoidance ability, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, FrB122, 3877/3882 (2007)
- 9) R. Hodoshima, T. Doi, Y. Fukuda, S. Hirose, T. Okamoto, J. Mori : Development of a Quadruped Walking Robot TITAN XI for Steep Slopes Operation—Conceptual Design and Basic Experiment of Leg Driving Mechanism—, JRSJ, **23**-7, 81/91 (2005)
- 10) S. Hirose, H. Kikuchi, Y. Umetani : The Standard Circular Gait of the Quadruped Walking Vehicle, Journal of Robotics Society of Japan, **2**-6, 41/52 (1984)
- 11) Y. Sakakibara, K. Kan, Y. Hosoda, M. Hattori, M. Fujie : Low Impact Foot Trajectory for a Quadruped Walking Machine, Journal of the Robotics Society of Japan, **8**-6, 22/31 (1990)
- 12) K. Futagami, Y. Harada, S. Sakai, K. Nonami : Omni-directional Gait of Hydraulically Actuated Hexapod Robot COMET-IV, RSJ2008AC 1D 3-04, (2008)
- 13) K. Yamazawa, Y. Yagi, M. Yachida : Visual Navigation with Omnidirectional Image Sensor HyperOmni Vision, IEICE, **J79**-5, 698/707 (1996)
- 14) C. Geyer, K. Daniilidis : Catadioptric Projective Geometry, International Journal of Computer Vision, **45**-3, 223/243 (2001)
- 15) A. Ogawa, K. Kobayashi, O. Nakamura, J. Murai : Design and Implementation of DV Stream Over Internet, IEICE technical report Computer systems, **99**-37, 77/81 (1999)
- 16) Y. Onoe, K. Yamazawa, H. Takemura, N. Yokoya : Telepresence by real-time view-dependent image generation from omnidirectional video stream, Computer Vision and Image Understanding, **71**-2, 154/165 (1998)