5脚1腕ロボットの腕脚協調制御

高津 陽太^{*1}, 井上 健司^{*2}

Coordinated control for five-leg one-arm robots

Yota TAKATSU ^{*1} and Kenji INOUE ^{*2}^{*1,*2}Department of Bio-Systems Engineering, Yamagata University
4-3-16 Jonan, Yonezawa-shi, Yamagata 992-8510, Japan

Received: 15 April 2019; Revised: 23 July 2019; Accepted: 10 December 2019

Abstract

A working six-legged robot which can switch three modes of locomotion and manipulation by using some legs as arms is under development: six-leg mode and two kinds of four-leg two-arm modes, where the robot holds and manipulates an object with two arms. Attaching hands to the legs enables five-leg one-arm mode; the robot grasps a small object with one hand and manipulates the object with one arm, while walking stably with five legs. Because the arm has three DOF, the robot needs to move its body with the five legs in order to control the pose of the hand. The present paper proposes a coordinated control method of five legs and one arm to manipulate five-DOF pose of the hand. The robot stands on the five legs. From the desired velocity and angular velocity of the hand, the joint velocities of the arm and the velocity and angular velocity of the body are determined. From the determined body velocity and angular velocity, the joint velocities of the five legs are obtained. These joint velocities are commanded to the robot. If at least one of the five support legs reaches the limit of its movable area, the robot stops the arm and body temporarily. Then the five legs step to the center of their movable areas. After the five legs finish stepping, the robot resumes the control of the hand. Experiments of moving the hand along straight lines show the validity of the proposed method.

Keywords: Six-legged robot, Coordinated control, Pose control, Stepping, Manipulation

1. 緒 言

災害現場などの危険な環境でロボットが活動するには、様々な地形を踏破できる高い移動能力と、障害物を取り除く、必要物資を運ぶなどの作業能力が求められる。これまでに、障害物除去を行う双腕を搭載したクローラ型移動ロボット (羽澤他, 2012) や、双腕マニピレータを搭載した車輪型倒立振り子ロボット (佐藤他, 2013)、伸縮マニピレータ機構を搭載した移動ロボット (折戸他, 2014) などの研究が行われている。車輪式移動機構にマニピレータを搭載した車輪式移動マニピレータに関しては、障害物回避の経路計画 (Campana, et al., 2016)、冗長性を利用した姿勢の最適化や制御 (Ancona, 2017)、転倒回避 (Ding et al., 2019)、ドア開け動作 (Gao et al., 2019) などが研究されている。人型ロボットも、2脚の移動機構と2腕を持つ形態であり、近年様々な人型ロボットが開発され (Jung et al., 2018)、腕作業 (Cisneros et al., 2016) や全身動作 (Murooka et al., 2017) の研究が行われている。これらは、移動機構と作業用の腕がわかれているため、各々に専用の設計ができるという利点がある。しかし、移動のみを行うとき、腕はロボットにとっては重量負荷でしかない。重量負荷を減らすために腕の数を少なくすると、複雑な作業への対応が困難となる。これに対して、田窪らは腕脚統合型ロボット ASTERISK を開発した (田窪他, 2005, Takubo et al., 2006)。腕脚統合型ロボットは、脚と腕を兼用にし、状況に応じて脚の一部を腕に転用する。よって、トータルの脚の本数を抑えつつ、高い移動能力・作業能力を発揮できる。また、4脚の形態と人型ロボットのような2脚2腕の形態が可能なロボットも開発され、様々な地形の移動法や梯子昇りへの応用が図ら

れている (Sun et al., 2017, Hashimoto et al., 2017, Matsuzawa et al., 2018). ASTERISK は, 6 本の脚をボディから放射状に配置した構造となっている. 我々は, ボディに対する脚の取り付け位置を工夫することで, 脚移動と腕作業の 3 つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットを開発し, その移動能力・作業能力を拡大する研究を行っている (井上, 大江, 2008, Inoue et al., 2010, 佐藤, 井上, 2016, 鈴木, 井上, 2017). 3 つのモードとは, 移動のみを行う 6 脚モードと, 2 脚を腕に転用して 2 腕作業を行う 2 種類の 4 脚 2 腕モードである. ただし, ハンドが無い状態では, 2 腕で物体を挟んで移動する程度の作業しかできない. そこで先行研究(余他, 2013)では, すべての脚先に 4 本指ハンドを取り付けた. ハンドを使えば, 小物体を把持して 1 腕で移動・回転したり, ボルトやノブを掴んで回すなどの 1 腕でも可能な作業が増える. すなわち, 1 脚を腕に転用し, 残り 5 脚で安定に歩行する 5 脚 1 腕モードが可能となる.

腕と移動機構の協調を考えたとき, 移動マニピュレータや人型ロボットは, 腕 (マニピュレータ) 部分が, ハンドの位置・姿勢制御に十分な自由度 (例えば 6 自由度) を有している. 一方, このロボットのハンドで作業を行う場合, 腕は 3 自由度なので腕だけではハンドの位置・姿勢や速度・角速度を制御できず, 5 脚を使ってボディも動かす必要がある. 本研究では, 5 脚と 1 腕の協調により, ハンドの速度・角速度の 5 自由度を制御する方法を提案する. 5 脚を接地した状態で, 指令されたハンドの速度・角速度から腕の関節速度とボディの速度・角速度を求め, 求められたボディの速度・角速度を実現するための 5 脚の関節速度を求める. 得られた関節速度をロボットに指令して, ロボットを制御する. 脚が接地したままボディが動いていくと, 脚が可動範囲限界に到達することがある. そこで, 5 脚のうち 1 脚でも可動範囲限界に達したら, ハンドとボディの動きを一旦停止し, 全ての脚を可動範囲の中心に踏み替える. 踏み替え終わったら, 全ての脚に可動範囲限界までの余裕があるので, ハンドの 5 自由度制御を再開する. 以上の 5 脚 1 腕制御法の応用として, 単眼カメラで測定したハンドの位置誤差や角度誤差を小さくするように速度・角速度を制御するビジュアル・フィードバックの実験を行い, 提案手法の有効性を検証する.

2. 4 本指ハンドを持つ 6 脚作業移動ロボット

すべての脚先に 4 本指ハンドを取り付けた 6 脚作業移動ロボットとその寸法, 重量を図 1 に示す.

各脚の自由度は 3 で, 関節には ROBOTIS 社のサーボモータ Dynamixel RX-64 (角度分解能 0.29 deg, ストールトルク 5.2 Nm) を使用した. このロボットの特徴は, ボディの長手方向の片側 (図 1(a)の手前側) に 4 脚を, 反対側 (図 1(a)の奥側) に 2 脚を配置している点にある. この脚配置から, ロボットは移動のみを行う 6 脚モードと, 2 脚を腕に転用して 2 腕作業を行う 2 種類の 4 脚 2 腕モードに変化できる. ハンドが無くても, 2 腕で物体を挟んで移動する程度の作業は可能である. 3 つのモードの詳細は, 先行研究(佐藤, 井上, 2016)を参照されたい.

Fig.1 Working six-legged robot with four-fingered hand.

先行研究(余他, 2013)では, すべての脚先に図 2 に示す 4 本指ハンドを取り付けた. このハンドは, 各指の根元が図中の部材 A に連結されており, 部材 A が上下すると, 指が一斉に放射状に開閉する. 先行研究(余他, 2013)では部材 A を動かす構造に歪みが生じやすかったので, 本研究では図 2(a)(b)のように改良した. サーボモータを脚先に置き, 部材 A とモータとリンク B で繋ぐ. モータを回転すると, リンク B を介して部材 A が押し引きされ, 開閉の両方が可能となる. ハンド中心とモータが 1 直線上にあるため, 先行研究(余他, 2013)より開閉しやすくなっている. 新しいハンドの物体把持の様子を図 2(c)に示す. サーボモータには, ROBOTIS 社の Dynamixel XM-430 (角度分解能 0.088 deg, ストールトルク 4.8 Nm) を用いた.

ロボットの総自由度は, 脚の 18 自由度とハンド開閉の 6 自由度の計 24 自由度になる. 外部のコンピュータでロボットの動作を生成し, 位置制御されたモータに RS-485 (通信速度 1 Mbps) を介して指令角度を送り, ロボットを動かす. 指令の周期は 15 ms である. ロボットは, 外部直流電源 14 V を用いて駆動する.

Fig.2 Four-fingered hand.

3. 5 脚 1 腕協調制御法

3・1 5 脚 1 腕モード

ハンドを使えば 1 腕でも作業ができるので, 図 3(a)のように 1 脚を腕に転用した 5 脚 1 腕モードが可能となる. 2 腕で物体を挟む 4 脚 2 腕モードに比べ, 扱う物体は小さくなるものの, 図 2(c)のようにしっかりと物体を把持できる. なお, 脚のハンドは閉じた状態とする.

図 3(b)(c)のように, 腕は 3 自由度なので腕だけではハンドの位置・姿勢や速度・角速度を制御できず, 5 脚を使ってボディも動かす必要がある. さらに, ボディの移動量が大きくなれば脚が可動範囲限界に達するので, 踏み替えなければならない.

Fig.3 Five-leg one-arm mode. Coordinated control of five legs and one arm enables 5-DOF manipulation of grasped object.

本研究では、5脚と1腕の協調により、ハンドの速度・角速度の5自由度を制御する方法を提案する。図1(a)のように脚に番号1~6をつけ、脚1を腕に転用する。脚2を腕に転用する場合も、腕・脚の番号が異なるだけで、方法は同じである。図4のように、ボディに固定された座標系を Σ_B 、腕の第1関節に固定された座標系を Σ_C 、 Σ_C を腕のハンド先端まで平行移動した座標系を Σ_E とする。座標系はすべて右手系である。 Σ_B の原点はボディ中心で、 X_B 軸はFig.1(b)の側面図で右向き、 Z_B 軸はFig.1(b)の側面図で上向きに設定する。 Σ_C の原点は腕の第1関節の中心で、 X_C 軸は第2関節に向かう方向、 Z_C 軸は Z_B 軸と平行で第1関節の関節軸に取る。構造上、ハンドを X_E 軸回りに回転するには脚を上下してボディを傾ける必要があるが、その可動範囲は狭い。よって本研究では、 X_E 軸回りの回転は行わず、座標系 Σ_E で表されたハンドの3次元速度 $\mathbf{v}_E = [v_{Ex}, v_{Ey}, v_{Ez}]^T$ と、 Y_E 軸・ Z_E 軸回りの2次元角速度 $\boldsymbol{\omega}_E = [\omega_{Ey}, \omega_{Ez}]^T$ を考える。ボディは地面に平行のままで X_B 軸・ Y_B 軸回りの角速度はゼロとし、座標系 Σ_B で表されたボディの3次元速度を $\mathbf{v}_B = [v_{Bx}, v_{By}, v_{Bz}]^T$ 、 Z_B 軸回りの角速度を ω_{Bz} とする。腕の第1関節を回転すると、ハンドに X_E ・ Y_E 面内の速度と Z_E 軸回りの角速度が発生する。このハンドの動きは、腕の第1関節を動かさなくても、ボディの速度 v_{Bx}, v_{By} と角速度 ω_{Bz} で実現できる。そこで、第1関節の関節角度は固定し、腕の第2、第3関節の関節角度をまとめて $\mathbf{q}_1$ 、関節速度を $\dot{\mathbf{q}}_1$ と表す。脚 $i(i=2\sim6)$ の3つの関節角度をまとめて $\mathbf{q}_i$ 、関節速度を $\dot{\mathbf{q}}_i$ とし、座標系 Σ_B で表された脚 i 先端の3次元速度を $\mathbf{v}_i = [v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}]^T$ とする。

Fig.4 Coordinate systems and variables.

3・2 5脚支持状態における5脚1腕協調制御法

5脚を接地した状態で、指令されたハンドの速度 $\mathbf{v}_E$ ・角速度 $\boldsymbol{\omega}_E$ から腕の関節速度 $\dot{\mathbf{q}}_1$ とボディの速度 $\mathbf{v}_B$ ・角速度 ω_{Bz} を求め、この $\mathbf{v}_B$ ・ ω_{Bz} を実現するための5脚の関節速度 $\dot{\mathbf{q}}_i(i=2\sim6)$ を求めて、ロボットを制御する。

はじめに、腕に関して次の速度関係式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_E \\ \boldsymbol{\omega}_E \end{bmatrix} = J_e \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \omega_{Bz} \\ \dot{\mathbf{q}}_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

J_e は腕のヤコビ行列で、 5×6 行列になる。式(1)は冗長系なので、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \omega_{Bz} \\ \dot{\mathbf{q}}_1 \end{bmatrix} = J_e^+ \begin{bmatrix} \mathbf{v}_E \\ \boldsymbol{\omega}_E \end{bmatrix} + (I - J_e^+ J_e) \mathbf{w} \quad (2)$$

ここで、 J_e^+ は J_e の疑似逆行列、 I は 6×6 の単位行列、 $\mathbf{w}$ は冗長性を表す任意の6次元ベクトルになる。 $\mathbf{w}$ は以下のように定める。ボディの動きのうち、平面運動(X_B 軸・ Y_B 軸方向の移動と Z_B 軸回りの回転)は、後述する脚の踏み替えにより制限なく動くことができる。しかし、地面に対するボディの高さには限界がある。そこで、次の評価関数を定義する。

$$V(z_B) = \begin{cases} (z_B - z_{Bmax})^2 & : z_B > z_{Bmax} \\ 0 & : z_{Bmin} \leq z_B \leq z_{Bmax} \\ (z_B - z_{Bmin})^2 & : z_B < z_{Bmin} \end{cases} \quad (3)$$

図5のように、 $V(z_B)$ は、地面に対するボディ高さ z_B が範囲 $z_{Bmin} \leq z_B \leq z_{Bmax}$ から離れるほど大きくなる。よって、 $V(z_B)$ を z_B で偏微分した次式を $\mathbf{w}$ とすれば、ボディ高さ z_B が過大・過小になるのを防ぐことができる。ボディ高さ z_B は、脚の関節角度 $\mathbf{q}_i$ から脚の順運動学を解いて脚先の位置を計算すれば求められる。

$$\mathbf{w} = -k_z \left[0, 0, \frac{\partial V}{\partial z_B}, 0, 0, 0 \right]^T \quad (4)$$

ここで、 k_z は適当な正の定数である。

Fig.5 Evaluation function on body height for redundant control.

次に、脚 $i(= 2 \sim 6)$ に関して次の速度関係式が成り立つ。

$$\mathbf{v}_i = J_i \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \omega_{Bz} \\ \dot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} = [I \quad J_{bi} \quad J_{fi}] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_B \\ \omega_{Bz} \\ \dot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} = \mathbf{v}_B + J_{bi}\omega_{Bz} + J_{fi}\dot{\mathbf{q}}_i \quad (5)$$

J_i は脚 i のヤコビ行列で、 3×7 行列になる。 I は 3×3 の単位行列、 J_{bi} 、 J_{fi} は J_i の4～7列を分割した行列で、それぞれ 3×1 行列、 3×3 行列となる。脚は接地して動かないので、 $\mathbf{v}_i = \mathbf{0}$ 。よって、

$$\dot{\mathbf{q}}_i = J_{fi}^{-1}(\mathbf{v}_B + J_{bi}\omega_{Bz}) \quad (6)$$

式(2)(3)により、指令されたハンドの速度 $\mathbf{v}_E$ ・角速度 ω_E から腕の関節速度 $\dot{\mathbf{q}}_1$ とボディの速度 $\mathbf{v}_B$ ・角速度 ω_{Bz} を計算する。さらに、計算されたボディの速度 $\mathbf{v}_B$ ・角速度 ω_{Bz} を式(6)に代入すれば、脚 $i(= 2 \sim 6)$ に関節速度 $\dot{\mathbf{q}}_i$ が算出できる。このロボットは、関節角度 $\mathbf{q}_i(= 1 \sim 6)$ の指令値をサーボモータに入力して動く。すべての関節速度 $\dot{\mathbf{q}}_i(i = 1, \dots, 6)$ が計算できたので、次式により関節角度 $\mathbf{q}_i$ の指令値を更新し、ロボットに指令する。

$$\mathbf{q}_i(t + \Delta t) = \mathbf{q}_i(t) + \dot{\mathbf{q}}_i \Delta t \quad (7)$$

ここで、 Δt は制御周期である。

3・3 踏み替え

3・2 節の方法で脚が接地したままボディが動いていくと、脚が伸び切るなどして限界に到達することがある。図6はロボットを上から見た図で、ボディに対する地面上の5脚の接地位置を示している。本研究では、各脚に対して、脚先が構造上到達可能な領域の内部に円形の可動範囲を設定する。構造上到達可能な領域すべてを使わずに円形に限定したのは、すべての方向に均等な移動能力をボディに持たせるためと、脚の順運動学を解いて脚先の位置を求めたときに、可動範囲限界に達したかどうかを判断しやすくするためである。また、後述する理由から、5脚の可動範囲は、ロボット重心の地面への投影点Gをできるだけ均等に取り囲むように設定する。

図のように、ボディから見た5脚は、ボディの移動とは逆向きに動く。5脚のうち1脚でも可動範囲限界に達したら、腕とボディの動きを一旦停止し、最初に脚2と6、次に脚4と5、最後に脚3の順に5脚全てを踏み替える。すなわち、腕と踏み替えない脚を停止させ、踏み替える脚を上昇させて可動範囲の中心に移動し、下降して着地させる。本研究では、任意のハンド速度 $\mathbf{v}_E$ ・角速度 $\boldsymbol{\omega}_E$ を入力可能としているため、ハンド速度 $\mathbf{v}_E$ ・角速度 $\boldsymbol{\omega}_E$ に応じたボディ速度 $\mathbf{v}_B$ ・角速度 $\boldsymbol{\omega}_{Bz}$ も時々刻々変化する。そこで、踏み替え後、すべての方向に均等に動きやすくするため、可動範囲中心に踏み替える。全ての脚の踏み替えが終わったら、全ての脚に可動範囲限界までの余裕ができるので、3・2 節の制御を再開する。

脚ロボットが静的に踏み替えを行う場合、安定領域内に重心の地面への投影点Gが無ければ、遊脚を上げることができない。よって、4脚ロボットの場合、遊脚を持ち上げる前にボディを動かして、支持3脚からなる安定領域内に点Gを移動させる必要がある。一方、5脚ロボットが上記の順で踏み替える場合は、点Gを取り囲むように5脚を配置しておけば、2脚踏み替え・1脚踏み替えのいずれにおいても安定領域は点Gを含むため、ボディを動かさなくても安定した踏み替えができる。また、4脚ロボットは1脚ずつの計4回の踏み替えが必要だが、5脚ロボットは3回の踏み替えですむ。

ロボットの踏み替えの様子を図7に示す。踏み替え前(a)と後(c)で、脚2～4の接地位置が変化している(脚5,6は見えない)。(b)は、踏み替え中に脚4と5が上昇している場面になる。

Fig.6 Condition of start stepping. If at least one support leg (e.g. Leg 5) reaches the limit of its movable area, the robot stops arm and body and starts stepping of all legs.

Fig.7 Stepping of robot.

4. 5脚1腕協調制御法の実験

4・1 実験方法

提案手法の応用として、単眼カメラで測定したハンドの位置誤差や角度誤差を小さくするように速度・角速度を制御するビジュアル・フィードバックの実験を行った。図8のように、腕の第1関節にカメラを固定する。カメラは、図4に示すカメラ座標系 Σ_C の X_C 軸方向を向いている。ハンドには、赤色のレーザーポインタを把持させる。カメラ座標系 Σ_C とハンド座標系 Σ_E は平行なので、ハンドの3次元速度 $\mathbf{v}_E$ と2次元角速度 $\boldsymbol{\omega}_E$ は座標系 Σ_C で入力できる。

Fig.8 Experimental setup: camera is attached to camera coordinate system, and hand grasps laser pointer.

行った3つの実験を図9に示す。(a)では、ロボットの正面に壁を置き、レーザーを当てる。ハンドを制御して、壁に描かれた水平な直線に沿ってレーザースポットを動かす。すなわち、水平(Y_E 軸)方向には一定速度 v_{Ey} を指令し、垂直(Z_E 軸)方向には、カメラで計測された直線とレーザースポットの位置誤差 δ_{Ez} を打ち消すように速度指令を与える。ハンドの姿勢は一定に保つ。直線はエッジ検出と直線抽出により、レーザースポットは赤色抽出とその重心計算により、位置を求める。制御則は次式になる。 $k_{Ez} > 0$ はフィードバックゲインである。

$$\mathbf{v}_E = [0, v_{Ey}, k_{Ez}\delta_{Ez}]^T, \boldsymbol{\omega}_E = [0, 0]^T \quad (8)$$

同様に、(b)では壁に描かれた垂直な直線に沿ってレーザースポットを移動させる。制御則は次式になる。 v_{Ez} は Z_E 軸方向の指令速度、 δ_{Ey} は Y_E 軸方向の直線とレーザースポットの位置誤差、 $k_{Ey} > 0$ はフィードバックゲインである。

$$\mathbf{v}_E = [0, k_{Ey}\delta_{Ey}, v_{Ez}]^T, \boldsymbol{\omega}_E = [0, 0]^T \quad (9)$$

(c)では、床に描かれた直線上の点C(緑色)にレーザースポットを当てるように、 X_E 軸 Y_E 軸方向を制御しつつ、カメラ画像上で直線が水平になるように、 Z_E 軸回りに回転させる。その結果、ロボットは点C周りに旋回する。制御則を示す。

$$\mathbf{v}_E = [k_{Ex}\delta_{Ez}, k_{Ey}\delta_{Ey}, 0]^T, \boldsymbol{\omega}_E = [0, k_{E\theta}\delta_{E\theta}]^T \quad (10)$$

カメラは水平で、レーザーは斜め下向きに床に照射しているため、点Cとレーザースポットの X_E 軸方向の誤差は、カメラ画像上では Z_E 軸方向の誤差 δ_{Ez} として計測される。よって、この誤差 δ_{Ez} を打ち消すように X_E 軸方向に速度指令を与える。 Y_E 軸方向には、カメラで計測された点Cとレーザースポットの位置誤差 δ_{Ey} を打ち消すように速度指令を与える。 Z_E 軸回りには、カメラで計測された水平に対する直線の角度誤差 $\delta_{E\theta}$ を打ち消すように角速度指令をする。 $k_{Ex} > 0$, $k_{Ey} > 0$, $k_{E\theta} > 0$ はそれぞれのフィードバックゲインである。

Fig.9 Experiments: Hand grasps laser pointer, and camera captures red laser spot. Robot controls hand so that the spot may move along (a) horizontal line and (b) vertical line. (c) Robot rotates with keeping the spot at a point.

4・2 実験結果

角度は無次元量なので、カメラ画像上でも、角度誤差は単位 rad で計測できる。一方、カメラは単眼なので 3 次元位置の計測はできず、位置誤差は長さの単位（例えば mm ）では測れない。しかし、カメラ画像上での pixel 単位の位置誤差でも、誤差の大きさの大小や符号は正しく得られる。フィードバック制御では、誤差にゲインをかけるため、誤差の大きさの大小と符号が正しければ、「誤差をゼロにする」フィードバックは可能である。また、制御による精度は計測に用いるセンサにも依存しており、センサで計測できる以上の精度は得られない。よって、制御則の検証という観点から、位置誤差はカメラで計測できる直接的な単位である pixel で記載する。

脚の可動範囲の半径を 50 mm とする。提案手法では、踏み替え中はハンドの制御を行っていない。よって、以下の図 10～12 のグラフでは、踏み替え中の時間変化は省き、踏み替えた時点を赤い線で示した。

式(8)のハンドの水平速度 $v_{Ey} = 10 \text{ mm/s}$ 、直線とレーザースポットの垂直方向の誤差 $\delta_{Ez} [\text{pixel}]$ に対するフィードバックゲイン $k_{Ez} = 0.167 \text{ mm}/(\text{s} \cdot \text{pixel})$ として、図 9(a)の実験を行った結果を図 10 に示す。図 10(a)はロボットの動作の様子、(b)は誤差 δ_{Ez} の時間変化である。レーザースポットの検出に失敗して誤差を計測できなかったときは、ハンドの指令速度をゼロとし、 δ_{Ez} は空白で示した。スタート時はレーザが直線から離れている。また、ボディの動きによってロボットには多少の揺れが生じる。図 10(b)から、この初期誤差と揺れによる誤差をゼロ付近に制御できている。

式(9)のハンドの垂直速度 $v_{Ez} = 1.25 \text{ mm/s}$ 、直線とレーザースポットの水平方向の誤差 $\delta_{Ey} [\text{pixel}]$ に対するフィードバックゲイン $k_{Ey} = 0.167 \text{ mm}/(\text{s} \cdot \text{pixel})$ として、図 9(b)の実験を行った結果を図 11 に示す。図 9(a)の実験と同様に、誤差 δ_{Ey} をゼロに制御できている。なお、ハンドを上昇させる動きのため、踏み替えは生じなかった。

Fig.10 Experimental results of moving along horizontal line: The error δ_{Ez} between the horizontal line and laser spot is reduced close to zero by the proposed method.

Fig.11 Experimental results of moving along vertical line: The error δ_{Ey} between the vertical line and laser spot is reduced to zero by the proposed method.

式(10)の点 C とレーザースポットの位置誤差 δ_{Ez} , δ_{Ey} [pixel], 水平に対する直線の角度誤差 $\delta_{E\theta}$ [rad]に対するフィードバックゲイン $k_{Ex} = k_{Ey} = 0.2 \text{ mm}/(\text{s} \cdot \text{pixel})$, $k_{E\theta} = 0.349 \text{ rad}/(\text{s} \cdot \text{rad})$ として, 図 9(c)の実験を行った結果を図 12 に示す. 図 12(c)から, 角度誤差 $\delta_{E\theta}$ は次第にゼロに近づいている. 本実験では, カメラが水平なので床の直線を斜め上から見ることになり, 計測される角度誤差 $\delta_{E\theta}$ は小さく, その分誤差の変化が粗くなっている. また, 地面に垂直な軸回りの角速度指令は点 C 回りではなく, ハンド座標系の Z_E 軸回りに与えている. よって, Z_E 軸回りにハンドが回転するとレーザースポットは点 C からずれる. このずれは, 特に Y_E 軸方向に大きくなる. 図 12(b)より, 生じたずれを減らすようにロボットが動き, 位置誤差 δ_{Ez} , δ_{Ey} がゼロ付近に保てていることがわかる. また, 踏み替えるとボディの位置が完全には同じにならないため, 誤差は不連続に変化している. 図 12(a)より, ロボットは地面に対して旋回していることがわかる.

Fig.12 Experimental results of rotating around a point on the ground: the robot rotates while keeping the errors δ_{Ez} and δ_{Ey} between the point C and laser spot close to zero by the proposed method.

5. 結 言

我々が開発している 6 脚作業移動ロボットの 5 脚 1 腕モードにおいて、5 脚と 1 腕の協調により、1 腕先端のハンドの速度・角速度 5 自由度を制御する方法を提案した。提案手法の応用として、1 腕根元にカメラを取り付け、ハンドにレーザーポインタを把持させた状態で、正面壁に照射したレーザースポットを壁に描かれた直線に沿って移動したり、床の 1 点にレーザースポットを保ちつつロボットを旋回させるビジュアル・フィードバック制御の実験を行い、提案手法の有効性を示した。

今後の課題は、踏み替え時にも一時停止せずにハンドを動かし続けるようにすること、ピックアンドプレースのようにハンドが物体や環境と接触する作業に拡張することである。

文 献

- Ancona, R., Redundancy modelling and resolution for robotic mobile manipulators: a general approach, *Advanced Robotics*, Vol.31, No.13 (2017), pp.706-715, DOI: 10.1080/01691864.2017.1326842.
- Campana, M., Lamiroux, F. and Laumond, J.-P., A gradient based path optimization method for motion planning, *Advanced Robotics*, Vol.30, No.17-18 (2016), pp.1126-1144, DOI: 10.1080/01691864.2016.1168317.
- Ding, X., Liu, Y., Hou, J. and Ma, A., Online dynamic tip-over avoidance for a wheeled mobile manipulator with an improved tip-over moment stability criterion, *IEEE Access*, Vol.7 (2019), pp.67632-67645, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915115.
- Cisneros, R., Nakaoka, S., Morisawa, M., Kaneko, K., Kajita, S., Sakaguchi, T. and Kanehiro, F., Effective teleoperated manipulation for humanoid robots in partially unknown real environments: team AIST-NEDO's approach for performing the plug task during the DRC finals, *Advanced Robotics*, Vol.30, No.24 (2016) pp.1544-1558, DOI: 10.1080/01691864.2016.1250674.
- Gao, H., Ma, C., Ding, L., Yu, H., Xia, K., Xing, H. and Deng, Z., Dynamic modeling and experimental validation of door-opening process by a mobile manipulator, *IEEE Access*, Vol.7 (2019), pp.80916-80927, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919964.
- Hashimoto, K., Kimura, S., Sakai, N., Hamamoto, S., Koizumi, A., Sun, X., Matsuzawa, T., Teramachi, T., Yoshida, Y., Imai, A., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K., Ma, G. and Takanishi, A., WAREC-1 - A four-limbed robot having high locomotion ability with versatility in locomotion styles, *Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics* (2017), pp.172-178.
- 羽澤寛志, 高橋俊太, 藤田豊己, 双腕を有するクローラ型不整地移動ロボットの障害物除去, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集* (2012), 1P1-G10.
- 井上健司, 大江寛次郎, 3 つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集* (2008), 1A1-E04.
- Inoue, K., Ooe, K. and Lee, S., Pushing methods for working six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2010), pp.4742-4748.
- Jung, T., Lim, J., Bae, H., Lee, K.-K., Joe, H.-M. and Oh, J.-H., Development of the humanoid disaster response platform DRC-HUBO+, *IEEE Transactions of Robotics*, Vol.32, No.1 (2018), pp.1-17.
- Matsuzawa, T., Imai, A., Hashimoto, K., Teramachi, T., Sun, X., Kimura, S., Sakai, N., Yoshida, Y., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K. and Takanishi, A., End-effector with a hook and two fingers for the locomotion and simple work of a four-limbed robot, *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2018), pp.2727-2732.
- Murooka, M., Ueda, R., Nozawa, S., Kakiuchi, Y., Okada, K. and Inaba, M., Global planning of whole-body manipulation by humanoid robot based on transition graph of object motion and contact switching, *Advanced Robotics*, Vol.31, No.6 (2017), pp.322-340, DOI:10.1080/01691864.2016.1266965.
- 折戸裕輔, 小野寺涼太, 小松伸悟, 秋山幸宏, 宇沼尚悟, 齋藤敬, 伸縮マニピュレータ機構による人間用環境対応移動ロボットの開発, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集* (2014), 1P1-O04.
- 佐藤拓磨, 永野健太, Canete Luis, 高橋隆行, 双腕マニピュレータを搭載した車輪型倒立振子ロボットの制御, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集* (2013), 2A1-P11.
- 佐藤悠, 井上健司, 異なる起伏の地形を移動する 6 脚ロボットのトライポッド歩容, *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.843 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00348.

- Sun, X., Hashimoto, K., Teramachi, T., Matsuzawa, T., Kimura, S., Sakai, N., Hayashi, S., Yoshida, Y. and Takanishi, A., Planning and control of stable ladder climbing motion for the four-limbed robot WAREC-1, Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.6547–6554.
- 鈴木愛瑠奈, 井上健司, 6脚作業移動ロボットの直立全方向歩容, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集 (2017), 1A1-B11.
- 田窪朋仁, 新井健生, 井上健司, 梅谷智弘, 林原靖男, 小柳栄次, 腕脚統合型ロボット「ASTERISK」の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集 (2005), ALL-N-004.
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Ochi, H., Konishi, T., Tsurutani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Integrated limb mechanism robot “ASTERISK”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2 (2006), pp.203-214.
- 余淑芬, 井上健司, 李秀雄, 小関博資, 4本指ハンドを持つ6脚作業移動ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集 (2013), 1A1-P13.

References

- Ancona, R., Redundancy modelling and resolution for robotic mobile manipulators: a general approach, Advanced Robotics, Vol.31, No.13 (2017), pp.706-715, DOI: 10.1080/01691864.2017.1326842.
- Campana, M., Lamiroux, F. and Laumond, J.-P., A gradient based path optimization method for motion planning, Advanced Robotics, Vol.30, No.17-18 (2016), pp.1126-1144, DOI: 10.1080/01691864.2016.1168317.
- Cisneros, R., Nakaoka, S., Morisawa, M., Kaneko, K., Kajita, S., Sakaguchi, T. and Kanehiro, F., Effective teleoperated manipulation for humanoid robots in partially unknown real environments: team AIST-NEDO's approach for performing the plug task during the DRC finals, Advanced Robotics, Vol.30, No.24 (2016) pp.1544-1558, DOI: 10.1080/01691864.2016.1250674.
- Ding, X., Liu, Y., Hou, J. and Ma, A., Online dynamic tip-over avoidance for a wheeled mobile manipulator with an improved tip-over moment stability criterion, IEEE Access, Vol.7 (2019), pp.67632-67645, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915115.
- Gao, H., Ma, C., Ding, L., Yu, H., Xia, K., Xing, H. and Deng, Z., Dynamic modeling and experimental validation of door-opening process by a mobile manipulator, IEEE Access, Vol.7 (2019), pp.80916-80927, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919964.
- Hashimoto, K., Kimura, S., Sakai, N., Hamamoto, S., Koizumi, A., Sun, X., Matsuzawa, T., Teramachi, T., Yoshida, Y., Imai, A., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K., Ma, G. and Takanishi, A., WAREC-1 - A four-limbed robot having high locomotion ability with versatility in locomotion styles, Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (2017), pp.172-178.
- Hazawa, H., Takahashi, S. and Fujita, T., Removing obstacle by tracked mobile robot with two arms, Proceedings of the 2012 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2012), 1P1-G10 (in Japanese).
- Inoue, K. and Ooe, K., Six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, Proceedings of the 2008 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2008), 1A1-E04 (in Japanese).
- Inoue, K., Ooe, K. and Lee, S., Pushing methods for working six-legged robots capable of locomotion and manipulation in three modes, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2010), pp.4742-4748.
- Jung, T., Lim, J., Bae, H., Lee, K.-K., Joe, H.-M. and Oh, J.-H., Development of the humanoid disaster response platform DRC-HUBO+, IEEE Transactions of Robotics, Vol.32, No.1 (2018), pp.1-17.
- Matsuzawa, T., Imai, A., Hashimoto, K., Teramachi, T., Sun, X., Kimura, S., Sakai, N., Yoshida, Y., Kumagai, K., Matsubara, T., Yamaguchi, K. and Takanishi, A., End-effector with a hook and two fingers for the locomotion and simple work of a four-limbed robot, Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2018), pp.2727-2732.
- Murooka, M., Ueda, R., Nozawa, S., Kakiuchi, Y., Okada, K. and Inaba, M., Global planning of whole-body manipulation by humanoid robot based on transition graph of object motion and contact switching, Advanced Robotics, Vol.31, No.6 (2017), pp.322-340, DOI:10.1080/01691864.2016.1266965.
- Orito, Y., Onodera, R., Komatsu, S., Akiyama, Y., Unuma, S. and Saito, T., Mobile robot for human environment with novel telescopic manipulators, Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2014), 1P1-O04 (in Japanese).
- Sato, T., Nagano, K., Canete, L. and Takahashi, T., Control of a wheeled inverted pendulum robot equipped with dual

- manipulator – A control method of disturbance compensation control using Extended State Observer and feedforward input –, Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2013), 2A1-P11 (in Japanese).
- Sato, Y. and Inoue, K., Tripod gait for six-legged robots walking on undulating terrain, Transactions of the JSME, Vol.82, No.843 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00348.
- Sun, X., Hashimoto, K., Teramachi, T., Matsuzawa, T., Kimura, S., Sakai, N., Hayashi, S., Yoshida, Y. and Takanishi, A., Planning and control of stable ladder climbing motion for the four-limbed robot WAREC-1, Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2017), pp.6547–6554.
- Suzuki, E. and Inoue K., Upright omni-directional gait for working six-legged robots, Proceedings of the 2017 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2017), 1A1-B11 (in Japanese).
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Umetani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Development of limb mechanism robot “ASTERISK”, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2005), ALL-N-004 (in Japanese).
- Takubo, T., Arai, T., Inoue, K., Ochi, H., Konishi, T., Tsurutani, T., Hayashibara, Y. and Koyanagi, E., Integrated limb mechanism robot “ASTERISK”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.2 (2006), pp.203-214.
- Yee, S. F., Inoue, K., Lee, S. and Koseki, H., Development of working six-legged robots with four-fingered hands, Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2013), 1A1-P13 (in Japanese).