

ZMP 制御による移乗支援ロボット

Development of Transfer Assistive Robot by ZMP Control

板倉 隆太 (鳥取大学大学院工学研究科) 鈴木 貴之 ((株)リンナイ)
竹森 史暁 (鳥取大学大学院工学研究科) 北村 章 (鳥取大学大学院工学研究科)

yuta Itaura, Graduate School of Engineering, Tottori University
Takayuki Suzuki, Linnai Company
Fumiaki Takemori, Graduate School of Engineering, Tottori University
Akira Kitamura, Graduate School of Engineering, Tottori University

Key Words: ZMP, Stewart Platform, Transfer Assistive Robot

1. はじめに

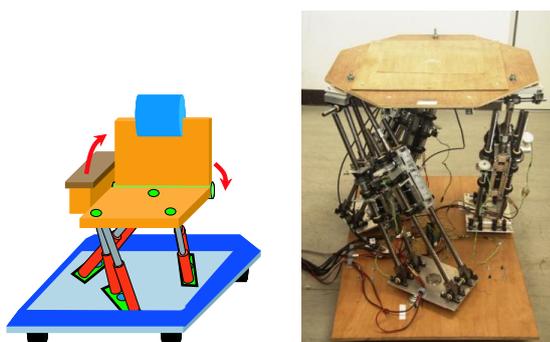
下肢障害者や歩行困難者など要介護者にとって病院・施設における移動は、寝たきり生活を防いだり、Q (Quality of life) の視点から考えても欠かせない動作である。そのため、自律移動など多機能化された車いす¹⁾、階段や傾斜など現状のインフラでの移動を目的とした歩行型移動ロボット²⁾などの研究が盛んに行われている。しかしながら、移動するためには要介護者のベッドと車いすなど福祉機器間での移乗が必要となる。

そこで本研究では、肉体的負担を減らすことやベッドとの高低差など物理的問題の解決を目的としたスチュワートプラットフォームによる座面を自由に移動・回転できる機能を持つ車椅子型移乗支援ロボットを提案する。この提案機構の力学モデルを導出し、運動制御システムを考案する。また ZMP を用いて搭乗者の重心移動を入力信号にすることでその方向へ移動する制御手法を提案し、その有効性を検証する。

2. 移乗アシストロボットの概要

2-1 ロボットの構造

本研究で製作するロボットの完成イメージ図を Fig. (a)、試作したロボットの概観を Fig. (b) に示す。



(a) Image of completion (b) Trial model

Fig. General view of transfer assist robot

本研究で用いるスチュワートプラットフォーム機構は

直動リンクの伸縮のみで位置・姿勢が変化し、回転リンクに比べてコンパクトな設計が可能となる。また、曲げの負担がかからないため剛性が高く、6本の直動リンクで支持されるため出力も高いことから人の重量を支えるのに適した構造といえる。

本研究の機構では、Fig. (a) と Fig. (b) の左上に示すように車台部と座面部との接続関節をそれぞれ 1個ずつとし、6本の直動リンクは 3本を 1組とした計 2組とすることで、拘束条件を少なくした機構とする。座面部と車台部の接続点はそれぞれ正三角形とした。直動リンクは³⁾Fig. (a) に示すようにモータの回転運動を伸縮運動に変換する構造とし、車台部と直動リンクの接続部には Fig. (b) の左下に示すフリーベアを用いた受動回転機構を取り付けた。車台底に車輪を取り付けることで、移乗後そのまま移動する手段となる。

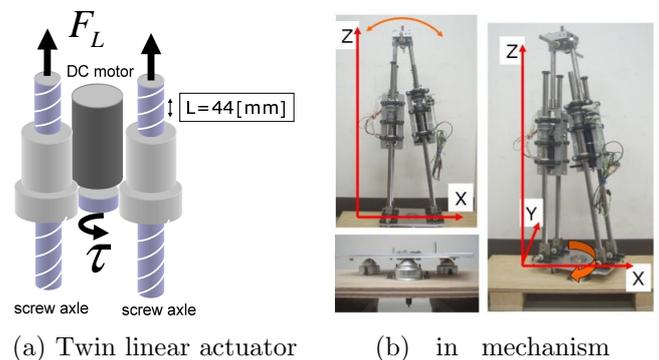


Fig. Mechanism of actuators

2-2 順運動学

直動リンクの長さから座面の接続点の座標を求める順運動学について述べる。Fig. に移乗支援ロボットのモデルを示す。Fig. の右に示すように1組のアクチュエータにおいて、2リンクのベース座標を原点とした2次元のローカル座標について考える。 $r_i (i = 1, 2)$ をベース接続点からの距離、 $l_i (i = 1, 2)$ を実リンクの長さとする、リ

リンクの交点 (x_w, z_w) は円の方程式を用いて

$$\begin{cases} x_w = \frac{F_d}{r_1} (r_1^2 - r_2^2) \\ z_w = \sqrt{r_1^2 - \left(x_w + \frac{F_d}{r_1}\right)^2} \end{cases} \quad ()$$

$$r_1 = \sqrt{\ell_1^2 + W^2}, \quad r_2 = \sqrt{\ell_2^2 + W^2}$$

で表わされる。また、原点からの距離を r とすると、 r と z 軸となす角 θ を使って次のようにも表せる。

$$\begin{cases} x_w = r \cos(\pi - \theta) \\ z_w = r \sin(\pi - \theta) \end{cases} \quad ()$$

() 式より、 θ は

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{x_w}{r}\right) = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{z_w}{r}\right) \quad ()$$

これより、 $\ell_i (i = 1, 2)$ を測定することで各リンクの頂点座標を求めることができる。

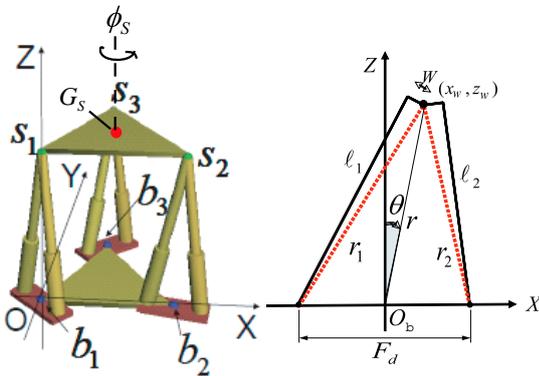


Fig. Configuration of links

ここで、3次元の極座標は Fig. から以下の式で求まる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \sin \theta \cos \phi \\ r \sin \theta \sin \phi \\ r \cos \theta \end{pmatrix} \quad ()$$

よって () 式で求めた値 θ と回転機構の回転角 ϕ 、ベース接点からの距離 r を () 式に代入することで座面の3接点の座標を導出できる。

2-3 逆運動学

リンク接続点の座標を実現するための各リンクの長さ導出を考える。座面の重心 $G_s(x_{gs}, y_{gs}, z_{gs})$ と座面の回転角度 ϕ_s を入力として与えるとき、例えば、座面座標の1

点 $s_1(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ の座標は重心から接点までの距離 d を用いて

$$\begin{cases} x_{s1} = x_{gs} + d \cos(\phi_s - \pi) \\ y_{s1} = y_{gs} + d \sin(\phi_s - \pi) \\ z_{s1} = z_{gs} \end{cases} \quad ()$$

で与えられる。これと $b_1(x_{b1}, y_{b1}, z_{b1})$ を結んだ直線の長さを r とすると、この距離 r は (6) 式で求めることができる。

$$r = \sqrt{(x_{s1} - x_{b1})^2 + (y_{s1} - y_{b1})^2 + (z_{s1} - z_{b1})^2} \quad (6)$$

次に、この r がベースプレート (xy 平面) となす角 θ を導出することで、 b_1 を原点としたローカル座標で考えた接点座標座標 (x_{L1}, z_{L1}) を求めることができる ((8) 式)。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{(x_{s1} - x_{b1})^2 + (y_{s1} - y_{b1})^2}}{z_{s1} - z_{b1}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{L1} = r \cos \theta \\ z_{L1} = r \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

これから、 r_1, r_2 の受動機構との接点は原点から $\frac{F_d}{2}$ 離れた位置にあるとしたとき、接点からの距離は (9) 式で求めることができる。

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{\left(x_{L1}^2 + \frac{F_d}{2}\right)^2 + z_{L1}^2} \\ r_2 = \sqrt{\left(x_{L1}^2 - \frac{F_d}{2}\right)^2 + z_{L1}^2} \end{cases} \quad (9)$$

従って、各リンクの長さ $\ell_i (i = 1, 2)$ は

$$\begin{cases} \ell_1 = \sqrt{r_1^2 - W^2} \\ \ell_2 = \sqrt{r_2^2 - W^2} \end{cases} \quad (10)$$

同様に他の4本のリンクについても求めることができる。

3. 運動制御システム

制御システムを導出するため、力学モデルを考える。並進運動や回転を行うために座面の重心 G_s に目標力・モーメントを与えたとき、アクチュエータの手先で発生する力を考える (Fig.)。座面でのプラットフォームの接続点をつないでできる三角形を $\Delta s_1 s_2 s_3$ 、車台部でできる三角形を $\Delta b_1 b_2 b_3$ とし座面の回転角を ϕ_s とする。各頂点から発生する力をそれぞれ $F_i (i = 1, 2, 3)$ とすると、その力ベクトルが X 軸となす角 $\psi_i (i = 1, 2, 3)$ 及び目標力 F_x, F_y 、目標モーメント T_s を用いて、両目標を満たすために各頂点から発生する力を求めると () 式となる。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ T_s \end{bmatrix} \quad ()$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi_1 & \sin \psi_1 & d \sin(\psi_1 - \phi_s + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos \psi_2 & \sin \psi_2 & d \sin(\psi_2 - \phi_s - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos \psi_3 & \sin \psi_3 & d \sin(\psi_3 - \phi_s + 0\pi) \end{bmatrix}^T$$

ここで、 $\Delta s_1 s_2 s_3$ の頂点の座標は重心から、角 $\psi_i (i = 1, 2, 3)$ は求めた頂点座標からそれぞれ計算できる。力 $F_i (i = 1, 2, 3)$ はアクチュエータの伸縮によって発生し、伸縮の長さ変化に関係することから座面の重心座標の変化は各直動リンクの長さを制御することで実現できる。

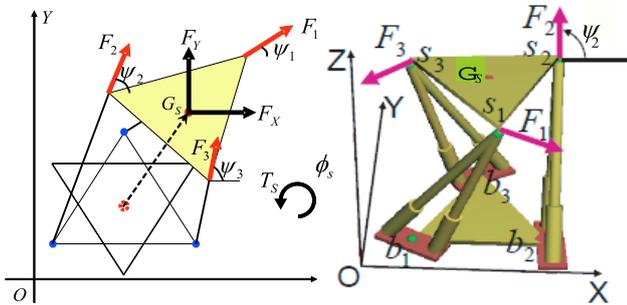


Fig. 6 mechanical model

4. 移乗動作

4-1 手順

ロボットの搭乗者がベッドへ移乗する場合を例にとって、動作手順の流れを Fig. 6 に示す。

- ・ 図中の左側にあるベッドに対して車輪移動によりロボットを近づける。座面はベッドより少し高めに調節する。
- ・ ベッドへ滑り移るため、隙間をなくすように座面位置をベッドに近づける（平行移動）
- ・ 移乗する際に足元の回旋角度を少なくすることで、楽に移乗できるように椅子の角度を調節する。（回旋運動）

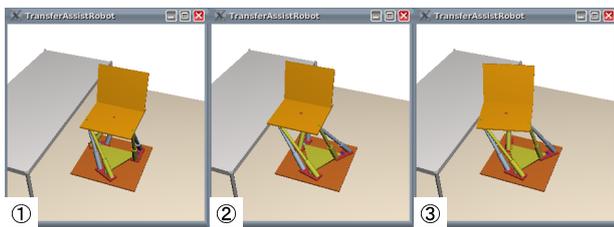


Fig.6 Procedure for transfer

平行移動と回旋運動を同時にすることで効率良く移動することができるが、このロボットの構造上、どの方向へも移動できなくなってしまう特異点が存在する。これを回避するために、リンクの長さを制限し特異点領域に入らないよう制御した。

4-2 重心移動による移動操作

操作方法に、搭乗者の操作感覚に合わせて動作する機能を持たせることで、使いやすい福祉機器を目指す。そこで、ベッドと座面の距離をつめるとき (Fig. 6-○) や、ロボットに乗った状態で少し離れた物を取りたいときなど座面の平行移動が必要なときの操作方法として、搭乗者の重心変化に応じた移動制御を提案する。制御方法としては、座面上に圧力センサを設置することで、ZMP (Zero-Moment Point) を観測し、その変化量に応じた移動を行う。ここで、ZMP とは分布して作用する力の総和が一点に作用するものとして置き換えた点のことで、Fig. 7 中の式によって導出できる (ただし、 f_i : 圧力センサ i の出力値、 (x_i, y_i) : 圧力センサ i の設置座標)。

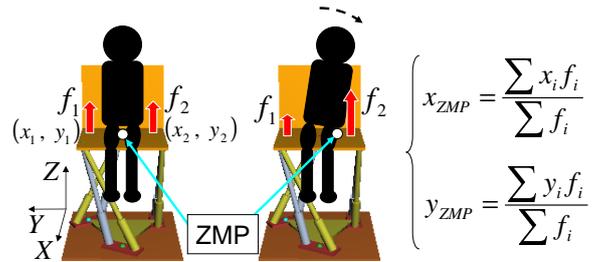


Fig.7 Concept of human's ZMP

一方、回旋運動に関しては座面の一部が回転する機構を持つことで、搭乗者の腰をひねらせる動作を感知し、座面全体の回旋運動へ反映させる。これから、提案操作手法による制御システムを Fig. 8 に示す。制御システムは、ZMP による搭乗者の意思を目標値とし、各直動リンクの長さを PI 制御によって実現する (ここで K_p : 比例要素、 K_i : 積分要素である) また、搭乗者からの入力がない間は現在の位置を維持する。

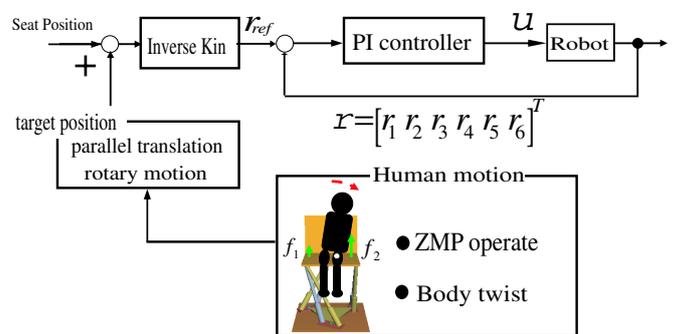


Fig.8 Control System

5. 実験

提案手法の有効性を確認するため、この操作方法を用いて、Fig. 6 に示す○、○の動作を行う実験をした。Fig. 9 および Fig. 10 にはそれぞれ X 軸 (前後) 方向と Y 軸 (左右) 方向の移動に関する結果を示す。上段に ZMP の変化、下段に座面の初期値からの変化量 (破線: 目標値、

実線：実測値)を示す。また、Fig. には、座面の回転運動に関する結果を示している(破線：目標値、実線：実測値)。

図に示す実験では、 \sim [s] 付近で X 軸方向への移動、 $8\sim$ [s] 付近で Y 軸方向への移動、 $8\sim 7$ [s] 付近で回転運動を行っている。Fig. 9 および Fig. 10 の下段の図を見ると上段の ZMP の変化量に応じて目標値が変化し、この目標に似たような軌跡を描いている。しかしながら、最大で 0.0 [m] 程の誤差が見られる。この原因に関して解析したところ、リンクのモータ制御は正しく行われているが、Fig. 10 に示した回転機構の回転角が目標値通りに動いていなかったため、計算上で誤差が生じたと考えられる。

6. おわりに

本研究では、人の操作感覚に合わせて動作する移乗アシストロボットの開発を行った。座面上にかかる ZMP を観測し、その変化量に応じた移動制御を行うことで、搭乗者にとってハンズフリーで直感的な動きに合わせた座面移動(方向・速度)の操作手法を提案し、有効性を実験により確認できた。

参考文献

- () 畑瀬ほか：インテリジェント車いすロボット TA Aicle, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 66 - 66 (2006)
- () 菅原雄介ほか：脚機構に平行メカニズムを用いた汎用 2 足口コモータの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 70, No. 691, pp. 182 - 189 (2004)
- () Fumia i Ta emori at al. : Proc. of the 2008 IEEE/ASME Int. Conf. of Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 99 - 99 (2008)

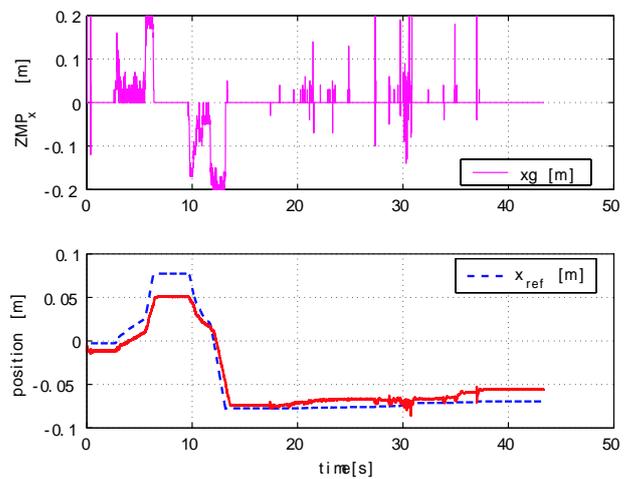


Fig.9 Transition of ZMP and sheet position toward X-axis

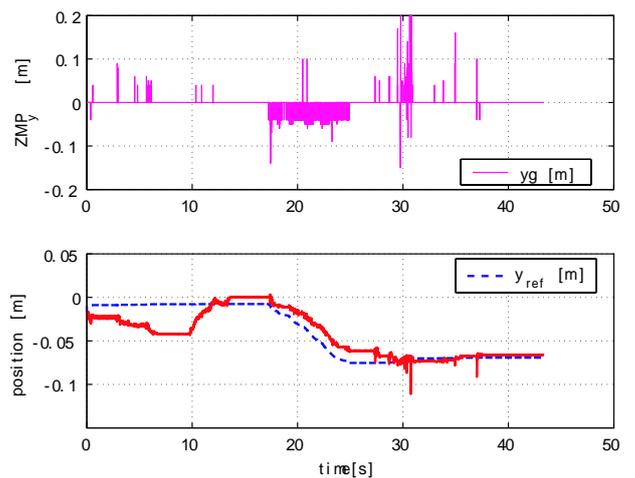


Fig. 10 Transition of ZMP and sheet position toward Y-axis

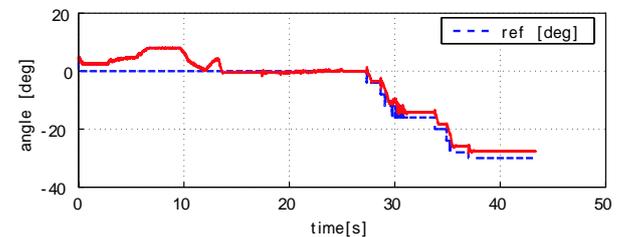


Fig. 11 Rotational motion at sheet