

着座姿勢方式移動感覚提示システムの開発

関口大陸*¹ 古賀大二郎*¹ 竹内大介*¹
稲見昌彦*¹ 川上直樹*¹ 前田太郎*¹ 舘 暲 *¹

Development of Seated Walker 2

Dairoku Sekiguchi,*¹ Daijiro Koga,*¹ Daisuke Takeuchi,*¹ Masahiko Inami,*¹
Naoki Kawakami,*¹ Taro Maeda*¹ and Susumu Tachi*¹

Abstract - This paper describes the development of new locomotion interface device called 'Seated Walker 2'. The 'Seated Walker 2' reproduces the walk sensation by a translational movement of the chair. By adding parallel link mechanism that converts the rotational movement around the waist to the translational movement of the chair, we succeeded in minimizing the size of the device. In this paper, we solved the relationship between the rotational movement around the waist and the translational movement of the chair and showed the way to control our new device. We also evaluated the performance of the 'Seated Walker 2'.

Keywords : Locomotion interface, Walk sensation, Humanoid robot, Cockpit, HRP

1. はじめに

近年、実作業に使用できるレベルの人間型二足歩行ロボットの登場に伴い、人間型二足歩行ロボットを遠隔操作するためのコクピットの開発が活発化している。中でも、人間型二足歩行ロボットのコクピットでの移動感覚提示装置は、従来とは異なり操作対象が二足歩行をするため、新たな研究開発の対象となっている。経済産業省によるプロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステム」(Humanoid Robotics Project:以降HRP) [1] では、人間型二足歩行ロボットを遠隔操作する大型のコクピット [2] が開発された。開発されたシステムは、9 面包囲型ディスプレイ [3] や外骨格型 7 自由度双腕マスタアーム [4] の他に、着座状態でのシート揺動による移動感覚提示装置を備えている。

現在までに、歩行による移動感覚をオペレータに対して提示する試みはいくつか行われており、人間の動作を忠実に反映しようというアプローチから他感覚による代行、あるいは象徴的・記号的な指示・提示方法まで多岐にわたる。人間の動作をなるべく忠実に反映しようというアプローチでは、能動制御型のトレッドミル [5] を用いた方法や能動型のフットパッド [6] を用いた方法などが提案されている。これらの実歩行動作を伴う装置は、概して装置が大がかりであり、加速度まで提示しようとする人間歩行動作の緩急に対応するために相当の空間を必要とする。もう一方の対極

にある移動指令・移動感覚提示方式は、視覚のみによる誘導や何らかのメタファを用いた(物理的には)静的なものであり、多くはパソコン端末で簡単に移動感覚を提示するために利用されている。移動指令方法としては、GUI やジョイスティックなどが利用される。当然のことながら、視覚のみによる誘導では前庭感覚や歩行動作によるその他の体性感覚を伴わないので、現実感に富む移動感覚提示が行われるとは言い難い。

本研究は、人間型二足歩行ロボットのコクピットに用いる移動感覚提示装置として、前述の実歩行動作を伴う装置と静的な移動感覚提示方法の中間に位置するような方法を対象とする。HRP の大型のコクピットで使用されている着座状態でのシート揺動による移動感覚提示装置は、そのような中間に位置する移動感覚提示方法の代表例といえる。HRP の移動感覚提示装置では、操作者は着座というよりもほぼ立位に近い状態で腰を体感シートに当てており、ロボットの運動によって生じる加速度によってシートの運動を制御し、前庭覚刺激による歩行感覚の提示を実現している。しかし、体感シートの並進三自由度方向の移動を直接 3 つのアクチュエータを用いて駆動していたため、各アクチュエータに大きな出力が要求され、装置が大型化してしまっていた。そこで、本論文では、並進方向の移動を直接駆動せずに、腰部での三自由度の回転を並進移動へ変換する手法により小型化を図った前庭覚刺激による着座姿勢方式移動感覚提示システムについて報告を行う。

*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

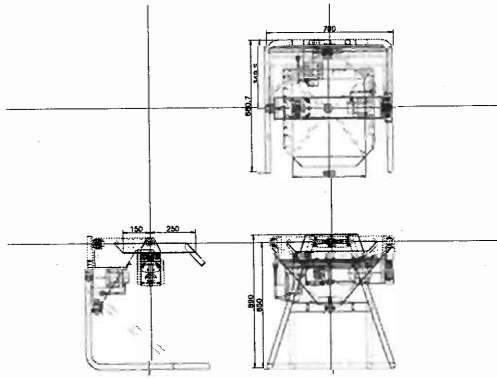


図1 着座部設計図
Fig.1 Drawing of chair part

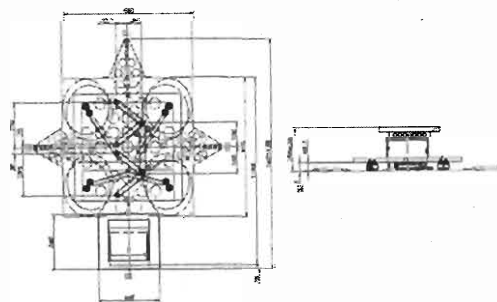


図2 平行リンク機構設計図
Fig.2 Drawing of parallel link mechanism

2. 着座姿勢方式移動感覚提示システム

図1に今回開発を行った移動感覚提示用システムの着座部の図面を示す。サイズは横70cm, 縦68cmであり, 座面の高さは65cmである。装置のフレームを基準にして, roll軸, pitch軸, yaw軸の順に回転が行われる。roll軸とpitch軸には400W, yaw軸には120Wのモータを使用し, ワイヤを介して各リンクを駆動する。各モータの可動範囲は $\pm 15[\text{deg}]$ である。各軸は400C/Tのエンコーダを用いて回転角を検出し, 原点位置合わせはLEDとフォトディテクタにより行う。

着座部の下部に, 図2の平行リンク機構が設置されている。この平行リンク機構により, 着座部の装置を回転させることなく平行移動することが可能になる。リンク機構は地面にボールベアリングで接しており, 滑らかに移動することが可能である。この平行リンク機構の可動範囲は, 前後左右にそれぞれ $\pm 13[\text{cm}]$ である。また, リンク機構により支えられる上部装置は, 四方からバネで牽引されている。これにより, 座面は常にバネの平衡位置, すなわちリンク機構部の中央に引き戻されることになる。図3に装置の全景を示す。

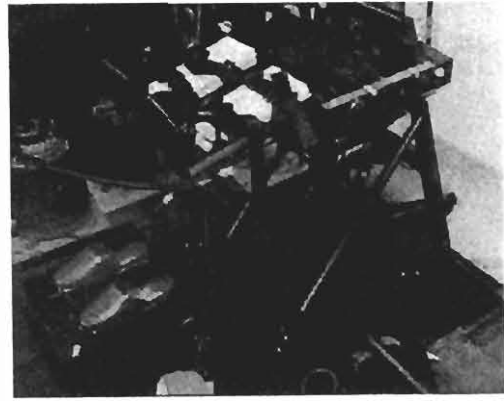


図3 装置全景
Fig.3 Overview of Seated Walker 2

3. 駆動方法

今回開発した移動感覚提示用システムは, 腰部で三自由度の回転が可能な着座部の下に平行リンク機構を設けることにより, 着座部全体を受動的に平行移動出来るようになっている。そこで, 装置に着座した人体の太股を座面に固定し, なおかつ足先を地面に固定すると, 装置と人体の脚部をあわせて, 一種のリンク機構と見なすことが可能となり, 腰部での三自由度の回転運動が, 着座部全体の平行移動運動を引き起こす。従って, リンク機構の解析を行い, 腰部三自由度の回転角と着座部の平行移動運動の関係を求められれば, 並進方向のアクチュエータを用いずに, 腰部の回転で任意の並進方向の移動を表現できるようになる。

3.1 駆動方法の導出

ここで, 人体と椅子をあわせて全体をリンク機構と考えた場合の, 床の2次元座標上の任意の一点と腰部回転三自由度の関係を導出する。

本来, 脚が 4×2 自由度, 装置が3自由度, 計11自由度を持つが, 本システムでは太股及び足先を固定するため, 系の自由度は, 腿の姿勢の拘束 3×2 自由度, 装置が脚と二箇所繋がることによる2自由度を減じ, 正味3自由度を持つ系となる。さらに, 座面の回転中心の床面からの高さは一定値をとるため, この系の表現できる自由度は残りの二自由度となる。

図4に, 本装置における座標系及び, 各回転角の定義を示す。すねの長さを $l_2[\text{m}]$, 腿の長さを $l_3[\text{m}]$, 座面の回転中心の地面からの高さを $l_4[\text{m}]$ と置く。 α は足首の傾き角, β は膝の曲げ角度, γ は膝のねじれ角度に相当する。この座標系を用いると, 両足の中心位置から人体の腰位置までの相対位置 $\mathbf{r} = (x, y, l_4, 1)^T$ は

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}_y(\alpha)\mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{D}_z(l_2(\gamma))\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{D}_z(l_3) \quad (1)$$

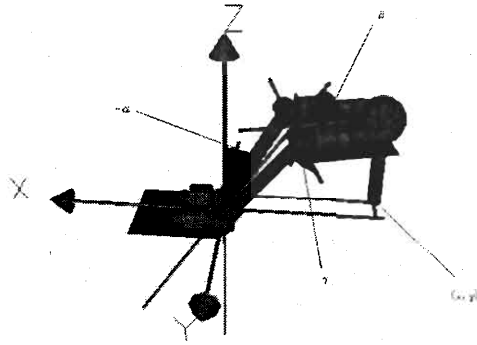


図4 装置の座標系
Fig. 4 Coordinate system of the device

と表される。\$l_2(\gamma)\$ は両足の中心位置から両膝の中心位置までの距離であり、

$$l_2(\gamma) = \sqrt{l_2^2 - 2l_1^2(1 - \cos \gamma)} \quad (2)$$

と表される。ここで、\$\gamma\$ は微小であるため、\$l_2(\gamma) = l_2\$ と置き換えることが出来る。(1)式を変形し、

$$\mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{D}_x(l_2)\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{D}_x(l_3) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_y(-\alpha)\mathbf{r}(3)$$

さらに変形して

$$\begin{pmatrix} l_3 \sin \beta \cos \gamma \\ l_3 \sin \beta \sin \gamma \\ l_3 \cos \beta + l_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos \alpha + l_4 \sin \alpha \\ y \\ -x \sin \alpha + l_4 \cos \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。(4)式の第1,第3等式の自乗和を取ると

$$x^2 + l_4^2 = (l_3 \sin \beta \cos \gamma)^2 + (l_3 \cos \beta + l_2)^2 \quad (5)$$

となる。よって、

$$\cos^2 \gamma = \frac{x^2 + l_4^2 - l_2^2 - 2l_2l_3 \cos \beta - l_3^2 \cos^2 \beta}{l_3^2 \sin^2 \beta} \quad (6)$$

ここで、(4)式の第2式より

$$\sin^2 \gamma = \frac{y^2}{l_3^2 \sin^2 \beta} \quad (7)$$

であるから、\$\sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma = 1\$ に(6)式と(7)式を代入して

$$\cos \beta = \frac{x^2 + y^2 + l_4^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (8)$$

と求めることができる。ここで、\$\beta\$ の定義域は \$-\pi \le \beta \le 0\$ である。なぜなら、\$\beta\$ は人体の膝関節角度の定義域と等しいからである。よって

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 + l_4^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right) \quad (9)$$

としてよい。また、(4)第2式より

$$\sin \gamma = \frac{y}{l_3 \sin \beta} \quad (10)$$

となる。ここで、\$\gamma\$ の定義域は \$-\frac{\pi}{2} \le \gamma \le \frac{\pi}{2}\$ である。なぜなら、\$\gamma\$ は人体の膝のねじれ角と等しいからである。よって

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{y}{l_3 \sin \beta} \right) \quad (11)$$

としてよい。また、ここで \$\tan A = \frac{l_4}{x}\$ とすると(4)第1式より

$$\cos(\alpha - A) = \frac{l_3 \cos \gamma \sin \beta}{\sqrt{l_4^2 + x^2}} \quad (12)$$

となる。\$\alpha - A\$ の定義域は概ね \$-\pi \le \alpha - A \le 0\$ に収まることが数値計算により判明しているため

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{l_3 \cos \gamma \sin \beta}{\sqrt{l_4^2 + x^2}} \right) + A \quad (13)$$

としてよい。

さて、\$\alpha, \beta, \gamma\$ の値を求めることができたが、座面を駆動するためには、これを roll(\$\psi\$), pitch(\$\theta\$), yaw(\$\rho\$) に変換する必要がある。\$\alpha, \beta, \gamma\$ の角度変化を施した場合と、\$\psi, \theta, \rho\$ の回転を施した場合における座面の座標軸の関係を、\$\mathbf{i} = (1, 0, 0)^T, \mathbf{j} = (0, 1, 0)^T, \mathbf{k} = (0, 0, 1)^T\$ とおくと

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y(\alpha)\mathbf{R}_z(\gamma)\mathbf{R}_y(\beta)(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}) \\ = \mathbf{R}_x(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_z(\rho)(\mathbf{k}, \mathbf{j}, -\mathbf{i}) \end{aligned} \quad (14)$$

となる。(14)式を展開し、

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{-\cos \alpha \sin \gamma}{\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta} \right) \quad (15)$$

$$\psi = \sin^{-1} (B + \sin \alpha \sin \gamma \cos \rho) \quad (16)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{C}{\cos \psi \cos \rho} \right) \quad (17)$$

$$B = (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \cos \beta) \sin \rho$$

$$C = -\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \cos \beta + \sin \psi \sin \rho$$

を得る。これで \$\psi = g_1(x, y), \theta = g_2(x, y), \rho = g_3(x, y)\$ を求めることができた。

4. 性能測定

今回試作を行った装置の性能評価として、X・Y各軸方向の直線運動を目標値として入力し、装置の追従性能を測定した。着座者の腰部位置は、三次元位置計測装置 (NDI社製 Optotrak) で計測を行った。

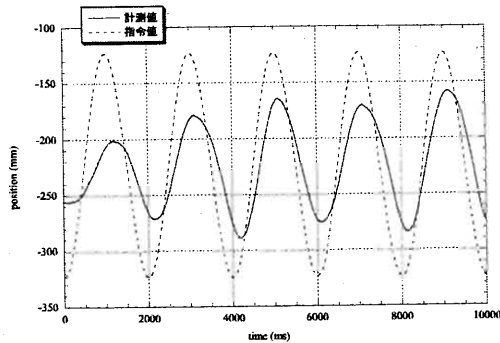


図5 X軸方向直線運動時の追従性能 (0.5Hz)
Fig.5 System performance of X-Axis motion

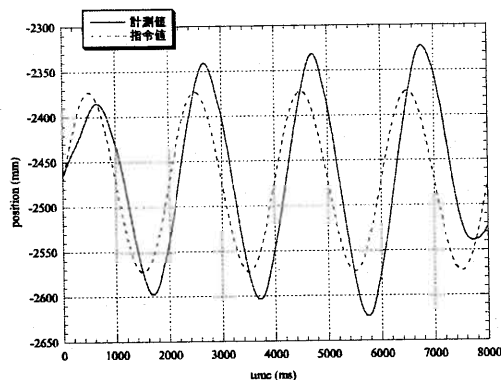


図6 Y軸方向直線運動時の追従性能 (0.5Hz)
Fig.6 System performance of Y-Axis motion

4.1 X軸方向直線運動

図5にX軸方向に0.5Hz, 振幅10cmの目標値を入力した際の腰部位置変化を表すグラフを示す。計測値のpeak-to-peakは約130mmで, 振幅は目標値の約0.65倍になっている。遅れはピーク時の時間差で見ると約150msである。

4.2 Y軸方向直線運動

図6にY軸方向に0.5Hz, 振幅10cmの目標値を入力した際の腰部位置変化を表すグラフを示す。計測値のpeak-to-peakは約300mmで, 振幅は目標値の約1.5倍になっている。遅れはピーク時の時間差で見ると約300msとなっている。

5. 考察

ここで行った何れの性能試験においても, 目標値におおむね従った結果が得られており, 腰部での回転運動を並進運動に変換可能であることが実際に示された。しかし, すべての追従実験において, オーバーシュートやアンダーシュートも同時に見られた。座面の制御に注目して実験結果を調べてみると, そのような現象が見られる場合でも, 座面の制御自体は目標値に追従している事を確認できた。したがって, 座面の制御が

オーバーシュートやアンダーシュートの原因ではなく, 座面と着座者の固定が完全ではなかったため, 座面から着座者の脚部が浮いてしまった事が原因であると考えられる。

6. むすび

本研究では, 前庭覚刺激による移動感覚提示を目的として, 腰部にあてた回転運動を, 着座者も含めて装置全体をリンク機構と考えることにより並進運動に変換して提示するコンパクトな着座型移動感覚提示装置の原理を提案し, 設計・試作を行った。設計した装置は, 着座部の下部に新たに設けた平行リンク機構によって, 並進方向の移動感覚を着座者に与えることが可能となった。また, 着座者を含んだリンク機構の解析を行うことにより, 腰部の回転角度とその結果生じる並進運動の関係を求め, 考案した原理に基づく装置の駆動方法を明らかにした。さらに, 試作した装置の性能試験を行うことにより, 今回提案を行った新たな駆動原理が有効に機能することを確認した。今後は, 本手法による移動感の定量的な評価などを行いコンパクトな移動感覚提示装置としての有効性を検証していくことが必要である。

参考文献

- [1] 井上博允, 比留川博久: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp. 2-7 (2001).
- [2] 館暁, 小森谷清, 澤田一哉, 井床利之, 井上幸三: 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp. 16-27 (2001).
- [3] T. Nishiyama, H. Hoshino, K. Suzuki, R. Nakajima, K. Sawada, and S. Tachi: Development of Surrounded Audio-Visual Display System for Humanoid Robot Control, *Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '99*, pp. 60-67 (1999).
- [4] H. Hasunuma, and et al.: Development of Teleoperation Master System with a Kinesthetic Sensation of Presence, *Proc. 9th International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '99*, pp. 53-59 (1999).
- [5] 岩田洋夫, 全方向無限平面を用いたロコモーションインタフェース, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.2, pp. 853-862
- [6] 岩田洋夫, 中泉文孝, 凹凸面を提示するロコモーションインタフェース *GaitMaster*, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.2, pp. 863-866