

平成 24 年 9 月修了  
博士（工学）学位論文

全方向移動型歩行訓練機の運動制御に関する研究

Motion Control of an Omnidirectional Walker for Walking Rehabilitation

平成 24 年 9 月 28 日  
高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
留学生特別コース

学籍番号 1138003

譚 仁鵬

Renpeng TAN



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 全方向移動型歩行訓練機の開発	3
1.3 研究目的	5
1.4 本論文の構成	6
参考文献	10
<b>第2章 中心と重心が一致する平面モデル1とその制御法</b>	<b>12</b>
2.1 緒言	12
2.2 中心と重心が一致する平面モデル1	14
2.3 非線形適応制御法	17
2.4 シミュレーションによる検討	20
2.5 結言	34
参考文献	36
<b>第3章 中心と重心が異なる平面モデル2とその制御法</b>	<b>37</b>
3.1 緒言	37
3.2 中心と重心が異なる平面モデル2	38
3.3 非線形適応制御法の改善	42
3.4 シミュレーションによる検討	45
3.5 結言	58
参考文献	59
<b>第4章 制御法におけるパラメータの自動調整</b>	<b>60</b>
4.1 緒言	60
4.2 ニューラル・ネットワークによる調整	61
4.2.1 ニューラル・ネットワーク	62

4.2.2	パラメータ調整結果	64
4.3	遺伝的アルゴリズムによる調整	68
4.3.1	遺伝的アルゴリズム	68
4.3.2	パラメータ調整結果	69
4.4	実験による検討	73
4.5	結言	81
	参考文献	82
<b>第5章</b>	<b>空間における三次元モデル</b>	<b>83</b>
5.1	緒言	83
5.2	推力を考慮した平面モデル	84
5.3	平面運動における三次元モデル	88
5.4	空間運動における三次元モデル	93
5.4.1	歩行訓練機の転倒条件	93
5.4.2	左右に転倒する場合	93
5.4.3	前後に転倒する場合	98
5.5	結言	103
	参考文献	104
<b>第6章</b>	<b>結論と今後の展開</b>	<b>105</b>
<b>謝辞</b>		<b>111</b>
	本論文に関する研究業績	113

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

歩行は、立位姿勢を保持しながら移動する、とても複雑な動作と言える。歩行運動は、健康を支え自立生活の基本である。しかし、高齢になると、筋力低下などによる活動性やバランス感覚、敏捷性、注意力が衰えることにより、転倒しやすくなる。事故や老化などで歩行機能障害を起こすと、素早く歩行リハビリテーションにより歩行機能を回復しないと、寝たきりになってしまう恐れがある。平成 22 年の厚生労働省による国民生活基礎調査では、介護が必要になった原因として、第一位に脳血管疾患、第二位に認知症、第三位に高齢による衰弱、第四位に転倒・骨折が挙げられている[1]。そのため、日本では急速に進んでいる高齢社会において、歩行リハビリテーションが益々重要になってきている。

現在、歩行リハビリテーションの現場では、平行棒、歩行車、簡易型歩行器が使われている[2]。図 1.1 に示すのは簡易平行棒である。簡易平行棒は自身の体重を上肢で支えることが可能な要訓練者が使用するものである。基本的には理学療法士が付き添って訓練を行う。図 1.2 に示すのは器具本体の中に体全体を入れて訓練する肘掛式の歩行器である。後方の車輪を固定することができ、前方の 2 輪がキャスターである場合が多い。介助施設などで多く普及しているが、車輪が固定されていないために器具本体に移動する途中で転倒する危険や使用中に上肢で支えきれず真下に転倒する危険もある。4 輪ともキャスターの場合には体が傾いただけで真横に移動してしまうこともある。またバランスを支える機能を持つ歩行システム[3, 4]や、動輪付歩行機[5]や、免荷機能を有する歩行機[6, 7]も研究開発されている。しかし、これらの歩行訓練器具は、前後方向の歩行訓練しかできない。



図 1.1 簡易平行棒



図 1.2 肘掛型歩行器

歩行運動は、前後方向運動だけではなく、左右方向運動、斜め方向運動、旋回、回転等から複雑な動作群から構成される。したがって、歩行障害のリハビリテーションでは、これらの複雑な動作群を万遍無く総合的にトレーニングすれば、早期回復が期待できる。そこで、効率的に多様な歩行訓練を実施できる歩行訓練機を開発することが、高齢社会にとって重要な課題となる。

著者の所属研究室の先行研究では、より人間の実歩行に近い多様な訓練を行うため、前後左右だけではなく、斜め、回転、旋回運動も実施できる全方向移動型歩行訓練機を開発した[8]。臨床試験により有用性があることが認められている[9, 10]。開発している歩行訓練機の概要については次節で記述する。

## 1.2 全方向移動型歩行訓練機

著者の所属研究室で開発された全方向移動型歩行訓練機について説明する。本研究室では現在までに5台の歩行訓練機を開発している。3号機において臨床実験を行い、運動機能に回復がみられた。そのため、新たに改良を加えた5号機となるが共同研究により実用化された。本論文では5号機を研究対象として運動制御法を開発する。全方向移動型歩行訓練機の写真を図1.3に示す。

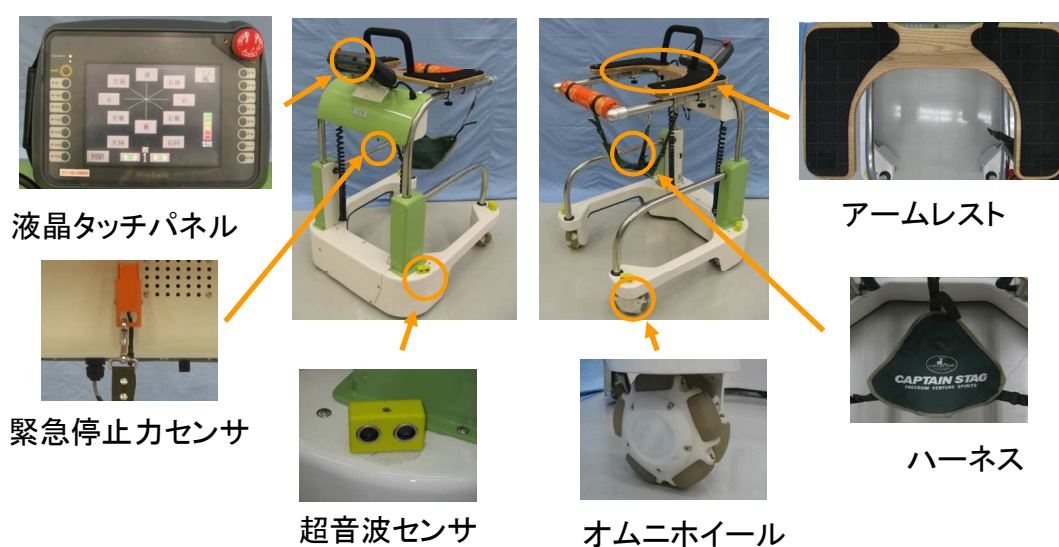


図 1.3 全方向移動型歩行訓練機



図 1.4 オムニホイール

次に全方向移動型歩行訓練機の特徴を説明する。この歩行訓練機は車輪にオムニホイールを4輪使用し、進行方向によって各オムニホイールの回転を変化

させることで全方向移動を可能にしている．オムニホイールと分解図を図 1.4 に示す．オムニホイールは回転することで円周方向に移動できる．又，オムニホイールの外輪にはフリーローラが取り付けられており，車輪軸方向にも受動的に移動できる．

歩行訓練機の操作方法としては，本体の前部に取り付けられているタッチパネルを使用して操作する．手動操作，もしくは設定された方向・距離に進行する自動運転がある．この自動運転の詳細設定は変更することも可能であり，要訓練者の状態にあった訓練プログラムを作成可能である．理学療法士が要訓練者の症状に応じてデザインした訓練メニューを訓練機に保存して，要訓練者が訓練メニューによって指定される経路を追従して歩行訓練を行う．

この歩行訓練機は訓練中の転倒事故を防止するための安全機能が取り付けられている．まず，訓練中はハーネス（あんしんシート）を下肢の間に通して訓練を行う．これにより真下への転倒を防止することができる．又，ハーネスに荷重が加わった場合には荷重センサが反応し，歩行訓練機は緊急停止する．後方部にはバックレストを取り付けており，後方への転倒を防止することができる．又，要訓練者もしくは理学療法士が危険と判断した場合には即座に停止できるように，緊急停止用の赤いボタンがタッチパネルの上部に取り付けてある．その他，超音波センサが障害物を検出した場合にも歩行訓練機は緊急停止する．



### 1.3 研究目的

全方向移動型歩行訓練機は、理学療法士が歩行訓練者の症状に応じてデザインした訓練メニューを訓練機に保存して、要訓練者が訓練メニューによって指定される経路を追従して歩行訓練を行う。しかし、現在指定される経路から追従誤差が生じる問題がある。経路追従誤差を繰り返し重ねると、運動メニューを十分に実現できなくなる。理学療法士の訓練メニューをより十分に実施或はよい訓練効果を得るためには、経路および軌道追従精度をより一層向上する必要がある。

今まで歩行訓練を実施する場合、訓練メニューによって指定される経路を追従するために開ループの制御法を使っており、経路追従精度が低いという問題が指摘されている。本論文は、経路追従精度をより一層向上させるために、要訓練者からの力に着目した閉ループの制御システムを開発する。歩行訓練を実施する時、要訓練者の肘掛け方による荷重の変化と重心の移動が、経路追従誤差を起こす原因として、主要であると考察している。一方、歩行リハビリテーションの時、要訓練者が全方向移動型歩行訓練機の垂直方向に肘を掛ける力だけではなく、歩行訓練機の水平方向に推力もある。この推力は、歩行訓練機の平進運動と回転運動を起こす。そこで、経路追従の精度を改善するため、推力の影響も考慮するモデルを導出する。さらに、歩行訓練機が三次元空間において、歩行訓練の安全性向上と転倒予防のため、転倒を考慮した歩行訓練機のモデルを構築する。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成ブロック線図は図 1.5 に示す。

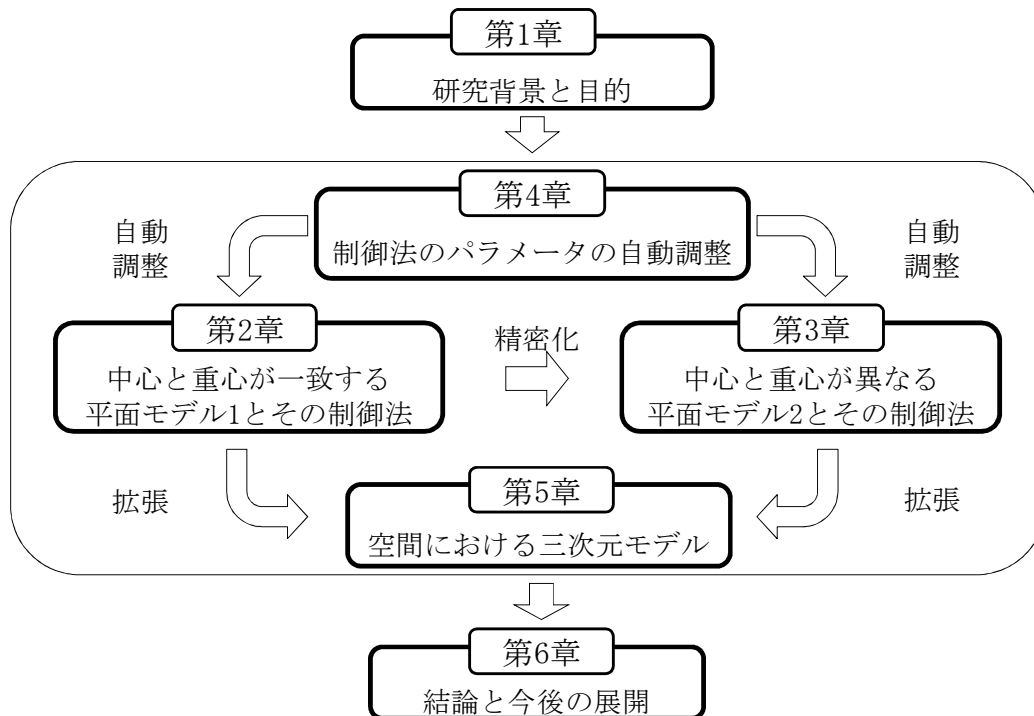


図 1.5 本論文の構成

本論文では、全方向移動型歩行訓練機の歩行訓練時における追従誤差を低減するために、経路追従精度に影響を与える各種要因を考察した結果として、要訓練者の肘掛け方による荷重の変化と重心の移動が重要な原因であることが分かった。そこで、荷重変化と重心移動に着目し、非線形適応制御法に基づいて、全方向移動型歩行訓練機の高精度運動制御法を開発する。また、最適な制御パラメータを速く探すために、ニューラル・ネットワーク (NN) と遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて適応制御のパラメータの自動調整法を提案する。さらに経路追従の精度を改善するため、要訓練者からの推力の影響も考慮し、空間に歩行訓練機の三次元モデルを構築し、転倒条件を分析する。

以下では、論文の各章について説明する。

第2章では、中心と重心が一致する平面モデル1とその制御法について記述する。

本論文は、経路追従精度をより一層向上させるために、荷重変化と重心ずれに着目した閉ループの制御システムを設計する。歩行訓練において、要訓練者別に歩行能力は異なり、歩行訓練機に掛ける荷重も変化する。したがって、この歩行訓練機システムのパラメータは未知である。現在よく使われている制御法の中、適応制御は制御対象の未知特性を推定し、この推定値に基づいて制御を行う方式である。本論文では、適応制御に基づいて全方向移動型歩行訓練機の経路追従制御法を開発する。

荷重変化の影響を抑制するのに適切な制御法を設計するために、全方向移動型歩行訓練機の数学モデルを導出することが必要である。まず、歩行訓練機の重心と中心は同じ位置にあると仮定して、重心位置がずれた場合を考慮した平面モデル1を導出した。この平面モデル1に基づいて、荷重変化と重心ずれの影響に適応する制御法を開発した[11]。適応制御法の推定則がオンラインで対象の未知パラメータを測定し、制御則を更新する。シミュレーションにより、荷重なしと荷重ありにも関わらず、精度の高い経路追従結果が得られた。よって、軌道追従・経路追従の精度向上に適応制御法が有効であることが示された。

第3章では、中心と重心が異なる平面モデル2とその制御法について記述する。

前章の適応制御法は重心と中心は同じ位置にあると仮定して開発したが、全方向移動型歩行訓練機は、機構は対称であるが、バッテリーや制御基板は前部に配置しているので、実際に歩行訓練機の重心は前寄りである。理学療法士の訓練メニューを実施する時、要訓練者は歩行訓練機の中心に追従していくため、中心の位置を目標経路に追従させる必要がある。

歩行訓練機の中心位置を考慮し、荷重変化と重心移動に対する中心と重心が異なる平面モデル2を導出し、その平面モデル2に基づいて非線形適応制御法を改善する[12]。シミュレーションにより異なる荷重変化と重心ずれが生じる場合でも、ほぼ同じ結果が得られることが示された。改善して非線形適応制御法の有効性を証明された。

第4章では、制御法における設定パラメータの自動調整について記述する。

第2章と第3章に提出した非線形適応制御法の設定パラメータによって経路追従精度は異なる。マニュアルで調整する場合、時間がかかる上に最適のパラメータを設定するのは困難であるため、自動的にパラメータを調整する方法が必要である。本論文では、パラメータの自動調整法としては、ニューラル・ネットワーク (NN) と遺伝的アルゴリズム (GA) が考えられる。

時間概念を含める経路追従誤差を評価規範として改めて定義し、NN を基づいてパラメータの自動調整法を提案した[13]。シミュレーションにより経路追従精度の向上が確認されたが、提案した NN では領域により極小解に陥る場合がある。そのため、GA に基づいた全方向移動型歩行訓練機の適応制御の設定パラメータの自動調整法を提案し[14, 15]、シミュレーションで適応制御法の最適なパラメータを探す。そのパラメータの最適値は歩行訓練機実験を実施する参考値として利用した。

実験では、人の影響を取り除くため、8 k g の荷物を歩行訓練機の片方に掛けて走行制御を行った。提案した適応制御を用いた実験の場合、荷重なしと荷重ありのいずれもほぼ同じ追従結果だった。一方 PID 制御では、荷重なしの場合も荷重ありの場合も、歩行訓練機が目標軌道から離れた。これらの結果により、全方向移動型歩行訓練機の経路追従誤差を軽減できることを実証でき、改善した非線形適応制御法の有効性が確認された。

第5章では、空間における三次元モデルについて記述する。

第2章と第3章では、荷重変化と重心ずれに対して全方向移動型歩行訓練機の運動制御法を開発した。しかし、歩行訓練機で歩行訓練する時、要訓練者の歩行訓練機に掛ける力は、垂直方向の圧力だけではなく、歩行訓練機の水平方向に推力もある。要訓練者からの推力が並進運動と回転運動を引き起こす。理学療法士の運動メニューを十分に実施するため、推力の影響を考慮することが必要である。また、歩行訓練機は空間にあるので、訓練する時歩行訓練機の転倒問題を考える必要がある。

第5章では、まず、要訓練者から推力に対して歩行訓練機は二次元モデルを導出する。次は歩行訓練機は空間にあるので、推力を考慮した二次元モデルを

基づいて, 平面上の並進運動と自転運動が説明できる三次元モデルを導出する.  
最後に, 歩行訓練機の転倒条件を考察し, 三次元空間で運動する歩行訓練機の  
角変位を理解できる三次元モデルを構築する.

第 6 章では, 結論と今後の展開について記述する.

## 参考文献

1. 平成 22 年 国 民 生 活 基 礎 調 査 の 概 況  
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa10/4-2.html>
2. T. Tamura, M. Sekine, H. Kuno, M. Fujie, A. Mori and K. Andoh: Evaluation of Walkers for elderly people, Proceedings of the 23rd Annual EMBS International Conference, pp.1391-1392, 2001.
3. D. Wyss, H. Vallery and R. Riener: Effects of added inertia and body weight support on lateral balance control during walking. Proceedings of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp.1-5, 2011.
4. A. Veg and D. B. Popovic: Walkaround: Mobile Balance Support for Therapy of Walking. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol.16, no. 3, pp.264-269, 2008.
5. K. Seo and J. Lee: The Development of Two Mobile Gait Rehabilitation Systems. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol.17, no.2, pp.156-166, 2009.
6. B. Novandy, C. Yoon and K. Park: A 6-DOF Gait Rehabilitation Robot With Upper and Lower Limb Connections That Allows Walking Velocity Updates on Various Terrains, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.15, no.2, pp.201-215, 2010.
7. K. Kubo, T. Miyoshi and K. Terashima: Influence of lift walker for human walk and suggestion of walker device with power assistance, International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp.525-528, 2009.
8. 王 碩玉, 河田耕一, 石田健司, 山本博司, 木村哲彦: 全方向移動型歩行訓練機, 第 17 回ライフサポート学会学術講演会論文集, pp.48, 2001.
9. 王 碩玉, 井上寛之, 河田耕一, 井上喜雄, 永野敬典, 猪野真吾, 石田健司, 木村哲彦: 全方向移動型歩行訓練機の開発と筋力増加の効果検証, 2007 年

- 福祉工学シンポジウム論文集, pp. 176-177, 2007.
10. 石田健司, 王 碩玉, 永野敬典, 岸孝司: 全方向移動型歩行訓練機を用いた運動訓練の有用性, 運動・物理療法, vol.19, no.4, pp.246-250, 2008.
  11. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, M. Nagano and M. G. Fujie: Adaptive Control Method For Path Tracking Control of an Omni-directional Walker Considering Center of Gravity Shift and Load Change, International Journal of Innovative Computing, Information and Control. vol.7, no.7(B), July, pp. 4423-4434, 2011.
  12. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Nonlinear Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Dynamic Model Improvement and Experiment, ICIC Express Letters, vol.6, no3, pp.611-615, March 2012.
  13. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Adaptive Control Algorithm with Parameter Optimization Using Neural Networks for an Omni-directional Walker, ICIC Express Letters, Part B: Applications, vol.1, no.2, pp.201-208, 2010.
  14. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Adaptive Control Strategy with Parameter Optimization for Omni-directional Walker, International Journal of Mechatronics and Automation. vol.1, nos.3/4, pp.172-180, 2011.
  15. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, Y. Kobayashi and M. G. Fujie: An Improved Adaptive Controller with Parameter Optimization by GA for an Omni-directional Walker, Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2012. (will be published)

## 第2章

# 中心と重心が一致する平面モデル1とその制御法

### 2.1 緒言

現在、歩行訓練を実施する場合、訓練メニューに指定された経路に追従するには、開ループの制御法が使われており、経路追従精度が低いという問題が指摘されている。本節は、経路追従精度をより一層向上させるために、荷重変化と重心ずれに着目した閉ループの制御システムを設計する。

歩行訓練において、要訓練者毎に歩行能力は異なっており、歩行訓練機に掛けた荷重と重心位置も変化する。要訓練者からの圧力で経路追従精度が影響されると考えている。圧力は歩行訓練機モデルのパラメータとして未知である。現在よく使われている制御法のうち、最適制御法は制御対象モデルのパラメータを知る必要がある[1, 2]。PID 制御は制御対象モデルのパラメータが未知の場合によく応用されるが、制御対象のパラメータが変化した場合、PID 制御のパラメータを調整する必要がある[3]。実際、歩行訓練時に PID 制御を使ったら、要訓練者毎に PID パラメータを調整する必要があるので、不便である。適応制御は、制御対象の未知特性を推定し、この推定値に基づいて制御を行う方式である[4-6]。そこで、歩行訓練機の入力行列は時変なので、歩行訓練機は非線形システムである。本節では、要訓練者の肘かけ方により荷重変化と重心ずれに対して、適応制御法に基づいて非線形システムの経路追従制御法の開発する。

荷重変化と重心ずれの影響を抑制する適切な制御法を設計するためには、全方向移動型歩行訓練機の数学モデルを導出する必要がある。本節では、まず、歩行訓練機の重心と中心は同じ位置にあると仮定して、荷重変化と重心位置がずれた場合を考慮した数学モデルを導出する。次に、この数学モデルに基づいて、荷重変化と重心ずれの影響に適応する制御法を開発する。開発した非線形適応制御法の推定則がオンラインで対象の未知パラメータを測定し、制御則を更新する。シミュレーションにより、軌道追従・経路追従の精度向上に制御法



の有効性が検証する.

## 2.2 中心と重心が一致する平面モデル1

制御システムを設計する際に，制御対象の動的な挙動を表す数学モデルを作ることが大切である．歩行訓練機の経路がずれる原因は荷重変化と重心ずれによるものと考えられる．そこで，本節では，重心位置がずれた場合を考慮したモデルによって，歩行訓練機の運動学及び動力学を導出する．

### 【運動学】

全方向移動型歩行訓練機を二次元モデル化し，歩行訓練機の重心  $G$  と中心  $C$  の位置が同じ位置にあると単純化する．要訓練者により中心から負荷重心  $G_H$  の位置がずれた場合の座標系の設定と構造モデルを図 2.1 に示す．各パラメータは，表 2.1 に示す．

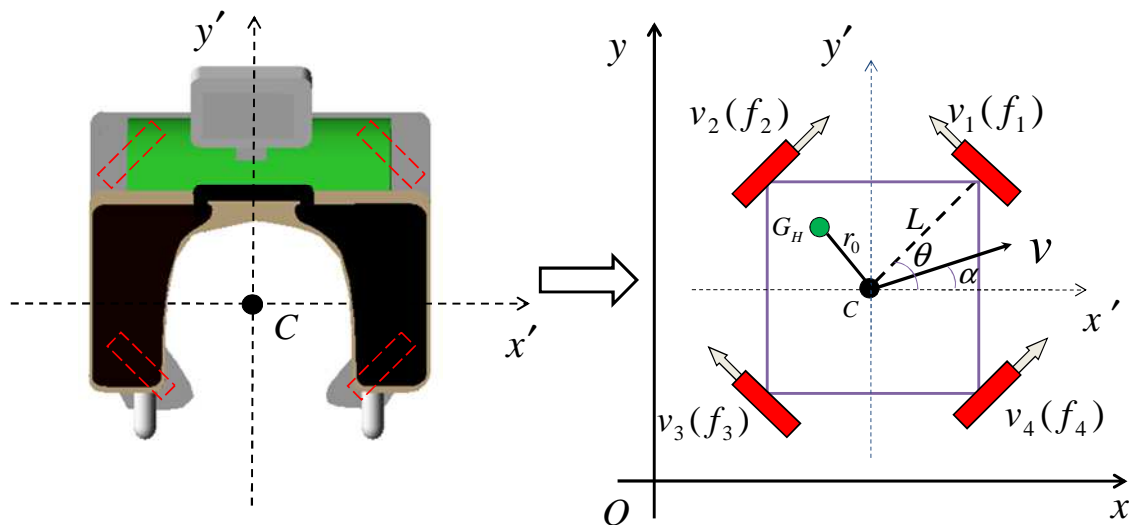


図 2.1 全方向移動型歩行訓練機の構造モデル

静止座標系  $o-xy$  に対して，回転をとみなわないで平行に移動する並進座標系  $C-x'y'$  を考える．図 2.1 のモデルにおいてオムニホイールの軸は歩行訓練機の中心  $C$  を通るものとする．また，歩行訓練機の基準姿勢は図 2.1 のように第 1 オムニホイールと  $x'$  軸との角度  $\theta$  である．

表 2.1 歩行訓練機のパラメータ

$f_i$	[N]	オムニホイール $i$ の駆動力( $i=1,2,3,4$ )
$v_i$	[m/s]	オムニホイール $i$ の速度( $i=1,2,3,4$ )
$v$	[m/s]	歩行訓練機 の速度
$\alpha$	[rad]	$v$ と $x'$ の成す角度
$L$	[m]	$C$ とオムニホイール の距離
$\theta$	[rad]	$x'$ 軸とアーム 1 の成す角度
$r_0$	[m]	$C$ と $G_H$ の距離
$I$	[kg・m <sup>2</sup> ]	歩行訓練機 の慣性モーメント
$M$	[kg]	本体の質量
$m$	[kg]	要訓練者の等価負荷

歩行訓練機の運動学は、次式のように、歩行訓練機の中心の速度と、各オムニホイールの速度との関係を表す。

$$\begin{cases} v_1 = -v_x \sin \theta + v_y \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) + L\dot{\theta} \\ v_2 = v_x \cos \theta + v_y \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) - L\dot{\theta} \\ v_3 = -v_x \sin \theta + v_y \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) - L\dot{\theta} \\ v_4 = v_x \cos \theta + v_y \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + L\dot{\theta} \end{cases} \quad (2.1)$$

式 (2.1) を整理し、次のように書くことができる

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & L \\ \cos \theta & \sin \theta & -L \\ -\sin \theta & \cos \theta & -L \\ \cos \theta & \sin \theta & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ここで、

$$v_x = v \cos \alpha, v_y = v \sin \alpha$$

### 【動力学】

剛体の動力学は、重心に全質量が集中したものとした並進運動に関するニュートンの運動方程式と、重心まわりの回転に関するオイラーの運動方程式で記述できる。図2.1の座標系における、動力学方程式は式(2.3)になる。

$$\begin{cases} (M+m) \ddot{x}_G = -f_1 \cos(\frac{\pi}{2}-\theta) + f_2 \cos \theta - f_3 \cos(\frac{\pi}{2}-\theta) + f_4 \cos \theta \\ (M+m) \ddot{y}_G = f_1 \sin(\frac{\pi}{2}-\theta) + f_2 \sin \theta + f_3 \sin(\frac{\pi}{2}-\theta) + f_4 \sin \theta \\ (I+mr_0^2) \ddot{\theta} = Lf_1 - Lf_2 - Lf_3 + Lf_4 \end{cases} \quad (2.3)$$

代数方程式(2.3)は形式的に、次のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+mr_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \\ L & -L & -L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

さらに、次の記号を用いると簡単に表すことができる。

$$M_0 \ddot{X} = BF \quad (2.5)$$

ここで

$$\ddot{X} = [\ddot{x}_G \quad \ddot{y}_G \quad \ddot{\theta}]^T, \quad F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T$$

マトリクス  $M_0$  とマトリクス  $B$  は、次のように定義する。

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I+mr_0^2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \\ L & -L & -L & L \end{bmatrix}$$

ただし、ベクトル  $\ddot{X}$  は歩行訓練機重心  $G$  における  $x$  軸方向加速度、 $y$  軸方向加速度、角加速度のベクトルである。式(2.5)中に、各パラメータの定義は表2.1に示す。 $m$  と  $r_0$  は要訓練者の体重や肘の掛け方により変わる。マトリクス  $B$  は入力行列であり、時間と共に変化する。動力学モデル式(2.5)より、歩行訓練機は非線形システムであることが分かる。

### 2.3 非線形適応制御法

歩行訓練時に良い訓練結果を得るためには、理学療法士が指定した訓練軌道と経路に高精度で追従する必要がある。歩行訓練機に要訓練者の体重が掛かることによる荷重変化と重心ずれが原因となり、目標軌道と経路に誤差が生じる。そのため、荷重変化と重心ずれに対応できる制御法は必要である。適応制御は周囲の環境などの要因により制御対象の特性が変化した場合、制御対象の変化に合わせて制御パラメータを変化させていく制御法である。したがって、本章では適応制御を基ついて荷重変化と重心ずれを考慮した全方向移動型歩行訓練機の運動制御法を開発する。

#### 【制御則設計】

歩行訓練機の未知パラメータは、動力学式 (2.5) にある慣性マトリクス  $M_0$  である。未知パラメータベクトル  $\alpha$  より次の関係式が成立し、行列  $Y$  を定義できる。したがって、式 (2.5) は式 (2.6) と書き換えられる。

$$Y\alpha = BF \quad (2.6)$$

この時、 $\alpha$  の推定値を  $\hat{\alpha}$  と表し、推定値で計算したものにすべて  $\hat{\phantom{x}}$  印をつけて表すとする、上式より次式が得られる。

$$\hat{M}_0 \ddot{X} = Y \hat{\alpha} \quad (2.7)$$

ここで、 $\hat{\alpha}$  は  $M_0$  の対角要素の推定値であり、それぞれ次のように表す。

$$Y = \begin{bmatrix} \ddot{x}_G & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{y}_G & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{M} + \hat{m} \\ \hat{M} + \hat{m} \\ \hat{I} + \hat{m} \hat{r}_0^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

この行列  $Y$  を用いて制御則と推定則を式 (2.10) と式 (2.11) のように与えれば、システムは安定となり、目標経路追従誤差は零に収束することが証明できる。

制御則：

$$F = B^T (BB^T)^{-1} [\hat{M}_0 (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + KS] \quad (2.10)$$

推定則：

$$\dot{\hat{\alpha}} = \Gamma^{-1} HS \quad (2.11)$$

ただし,

$$\hat{M}_0 = \begin{bmatrix} \hat{M} + \hat{m} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{M} + \hat{m} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{I} + \hat{m} r_0^2 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{Gd} + \lambda_1 \dot{e}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{y}_{Gd} + \lambda_2 \dot{e}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_3 \end{bmatrix},$$

$$X_d = [x_{Gd}, y_{Gd}, \theta_d]^T, \quad X = [x_G, y_G, \theta]^T,$$

$$S = \dot{e} + \lambda e, \quad e = X_d - X, \quad \dot{e} = \dot{X}_d - \dot{X}.$$

$\lambda, K, \Gamma$  :  $3 \times 3$  正定対角行列, 適応制御パラメータである.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

この場合の制御系構成図を図 2.2 に示す.

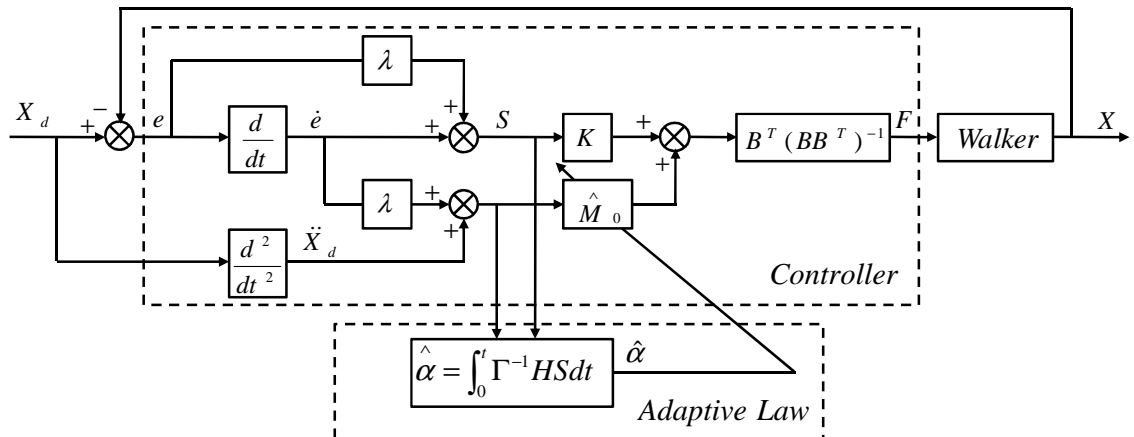


図 2.2 全方向移動型歩行訓練機の制御系構成図

### 【安定性分析】

正定関数：

$$V(t) = \frac{1}{2} [S^T M_0 S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \alpha] \quad (2.13)$$

この関数の時間微分を求め、式 (2.10) を利用して以下の式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T \dot{M}_0 \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{M}_0 S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \dot{\alpha} \\ &= S^T M_0 [(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + \lambda(\dot{X}_d - \dot{X})] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\alpha} \\ &= -S^T \{M_0 \ddot{X} - M_0 [\ddot{X}_d + \lambda(\dot{X}_d - \dot{X})]\} + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\alpha} \\ &= -S^T K S - S^T (\hat{M}_0 - M_0) [\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (2.14)$$

推定則式 (2.13)

$$\dot{\alpha} = \Gamma^{-1} H S$$

を代入する.

$$\dot{V}(t) = -S^T K S \leq 0 \quad (2.15)$$

この式より  $V(t)$  はリアプノフ関数であることがわかる.  $\dot{V}(t) < 0$  時, システムは安定となる.  $\dot{V}(t) = 0$  時,  $S = 0$  となる. これは

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

において  $S = 0$  とおいた同次方程式

$$\dot{e} = -\lambda e \quad (2.16)$$

の解について考えられる.

したがって,  $t \rightarrow \infty$  の時  $S \rightarrow 0$  となり,  $e \rightarrow 0$ ,  $\dot{e} \rightarrow 0$  となる.

安定性分析する時,  $\dot{M}_0 = 0$  と仮定する. 即ち, 一回の歩行訓練において,  $M_0$  は不変であるという意味である. 軌道誤差が零に収束することは, パラメータが真値に収束することを保証するものではないが, 推定則より推定値は定数ベクトル  $\hat{\alpha}(\infty)$  になる.

## 2.4 シミュレーションによる検討

本節は、導出した非線形適応制御法を用いて、荷重変化と重心移動に対する軌道・経路追従精度の向上についての有効性をシミュレーションで確かめる。

### 【目標経路】

歩行訓練機の全方向移動の特徴を生かして、追従効果を明確にするため、目標経路は円形経路とする。目標経路は下記の通りである。

$$[x_{Gd} - x_0]^2 + [y_{Gd} - y_0]^2 = r^2 \quad (2.17)$$

目標軌道は式 (2.18) のように設定する。

$$\begin{aligned} x_{Gd}(t) &= x_0 + r \cdot \cos\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ y_{Gd}(t) &= y_0 + r \cdot \sin\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ \theta_d(t) &= \frac{2\pi \cdot t}{60} + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ただし、 $a = -5.2 \times 10^{-4}$ 、 $b = 3.1 \times 10^{-2}$ 、 $0s \leq t \leq 60s$ 。

### 【初期設定】

シミュレーションにおけるパラメータの設定は、無荷重の場合に試行錯誤し調整した結果、適応制御のパラメータは、次の通りである。

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0003 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

初期条件は  $x_G(0)=6m$ 、 $y_G(0)=3m$ 、 $\theta(0)=45^\circ$ 。

### 【パラメータの収束】

図 2.3 は、パラメータが零の状態から開始し最適値に収束する様子を示している。図 2.3(a) の横軸は時間、点線は荷重なしの場合、即ち  $m = 0\text{ kg}$  と  $r_0 = 0.00\text{ m}$



の場合における $\hat{\alpha}_1$ の推定値, 実線は荷重ありの場合, 即ち $m = 60\text{ kg}$ と $r_0 = 0.30\text{ m}$ の場合における $\hat{\alpha}_1$ の推定値を表す. 図2.3 (b) と図2.3 (c)の座標設定についても図2.3 (a)と同様に設定している. 図2.3 (b)はパラメータ $\hat{\alpha}_2$ の推定結果であり, 図2.3 (c)はパラメータ $\hat{\alpha}_3$ の推定結果である.

図2.3により, 荷重なしの場合における推定パラメータは

$$\hat{\alpha}_1 = \hat{M} + \hat{m} = 58\text{ kg},$$

$$\hat{\alpha}_2 = \hat{M} + \hat{m} = 58\text{ kg},$$

$$\hat{\alpha}_3 = \hat{I} + \hat{m}\hat{r}_0^2 = 27.7\text{ kg}\cdot\text{m}^2.$$

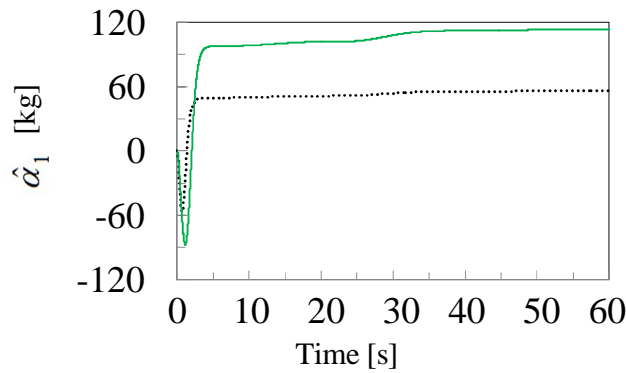
荷重ありの場合には

$$\hat{\alpha}_1 = \hat{M} + \hat{m} = 58 + 60 = 118\text{ kg},$$

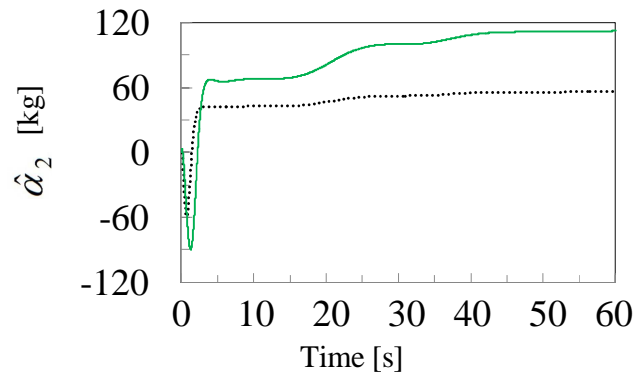
$$\hat{\alpha}_2 = \hat{M} + \hat{m} = 58 + 60 = 118\text{ kg},$$

$$\hat{\alpha}_3 = \hat{I} + \hat{m}\hat{r}_0^2 = 27.7 + 60 \times 0.30^2 = 27.7 + 5.4 = 33.1\text{ kg}\cdot\text{m}^2.$$

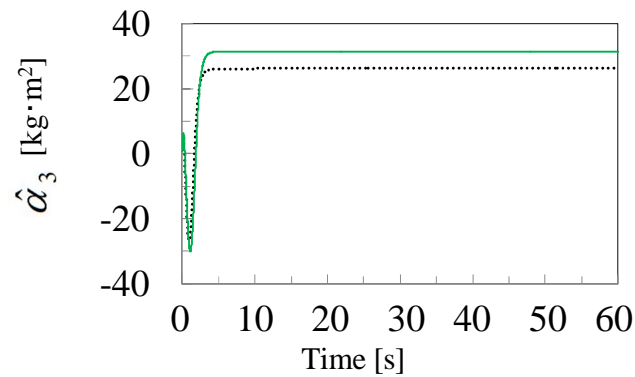
歩行訓練機は目標に追従して, 位置フィードバックの動作を繰り返すことにより, パラメータの適応処理を行っており, 40秒程度で完全に最適値に収束し, 適応制御が動作していることを確かめることができる. 適応制御のパラメータにより, 収束速度は異なるが, 最適値に収束することができる.



(a)  $\hat{\alpha}_1$ の推定質量



(b)  $\hat{\alpha}_2$  の推定質量

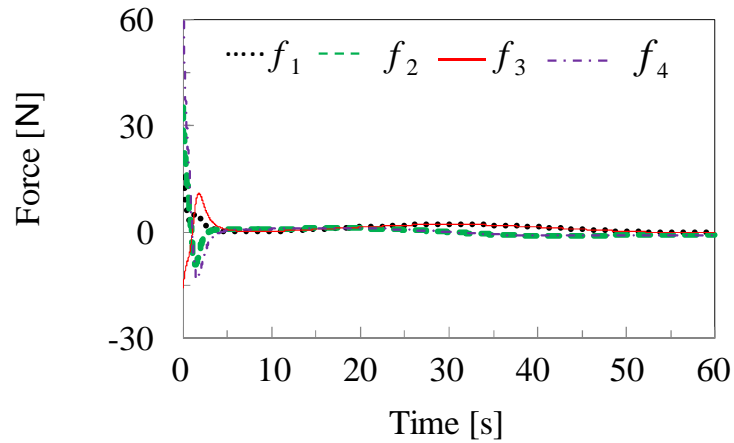


(c)  $\hat{\alpha}_3$  の推定質量

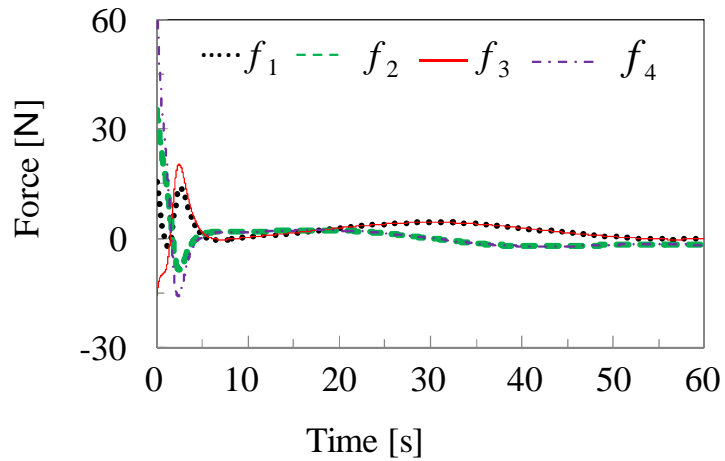
図 2.3 パラメータ推定結果

### 【制御力】

歩行訓練機のおムニホールの入力量，即ち適応制御の制御量を縦軸に，シミュレーション時間を横軸にとり，グラフに描いたのが図 2.4 である．四つのおムニホールの入力はそれぞれ， $f_1$ ， $f_2$ ， $f_3$ ， $f_4$ となる．図 2.4 (a) では荷重なしの場合における制御量であり，図 2.4 (b) では荷重ありの場合における制御量である．図 2.4 (b) は図 2.4 (a) より制御量が顕著に増加する．適応制御則式 (2.12) が示すように，慣性マトリクス  $\hat{M}_0$  が大きくなるにつれて，ベクトル  $F$  が増加することが分かる．



(a) 制御量－荷重なし



(b) 制御量－荷重あり

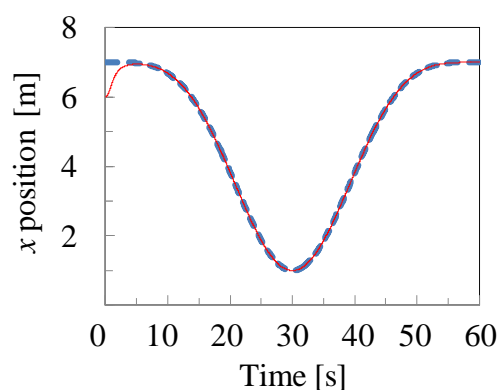
図 2.4 入力結果

### 【適応制御の制御結果】

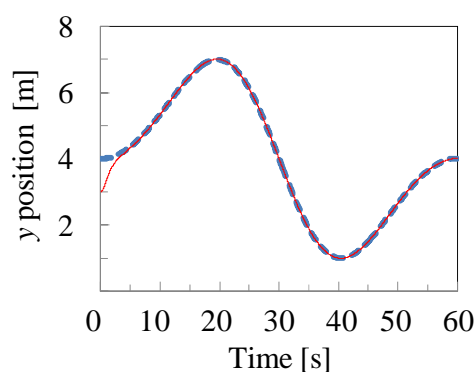
図 2.5 は荷重  $m=0\text{kg}$ , 重心ずれ  $r_0=0.00\text{m}$  の場合における制御結果である．図 2.5(a)では，横軸は時間，破線は  $x$  横軸の目標軌道，実線は  $x$  横方向における歩行訓練機の位置応答を示している．図 2.5(b)では，横軸は時間，破線は  $y$  縦軸の目標軌道，実線は  $y$  縦方向における歩行訓練機の位置応答を示している．図 2.5(c)では，横軸は時間，破線は本体の向き角度の目標軌道，実線は角度における歩行訓練機の向きの角度応答を示している．図 2.5(d)では，横軸は  $x$  横軸の位置応答，縦軸は  $y$  縦軸の位置応答，破線は目標軌道，実線は歩行訓練機の

位置応答を示している。

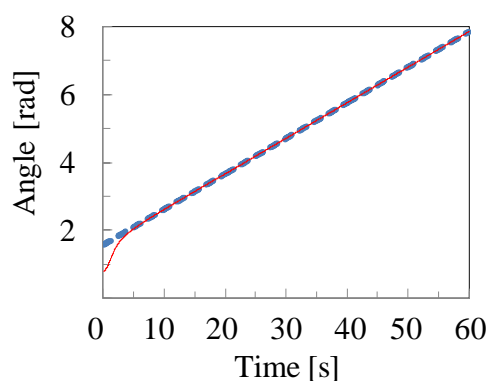
図 2.5(a), 図 2.5(b)と図 2.5(c)のように, 歩行訓練機が目標軌道に追従するためには 5s ほどかかる。しかし, 図 2.5(d)の制御結果でもわかるが良く追従している。図 2.6 では荷重  $m=60\text{kg}$ , 重心ずれ  $r_0=0.30\text{m}$  の場合の制御結果である。図 2.6 の設定は, 図 2.5 と同様である。図 2.6 と図 2.5 で示すように, 荷重の有無に関わらずほぼ同じ経路追従結果である。



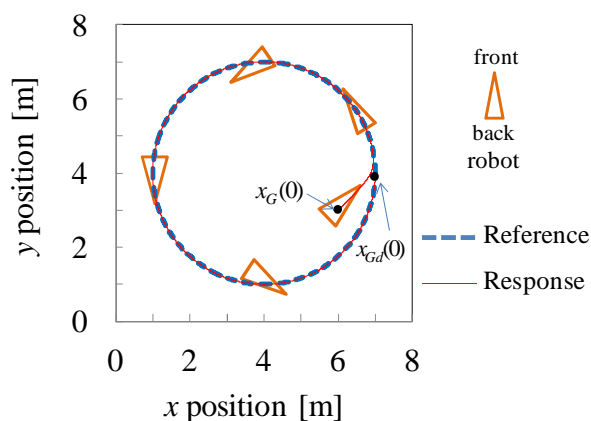
(a)  $x$  位置応答



(b)  $y$  位置応答



(c) 角度応答



(d) 制御結果

図 2.5 制御結果-荷重なし

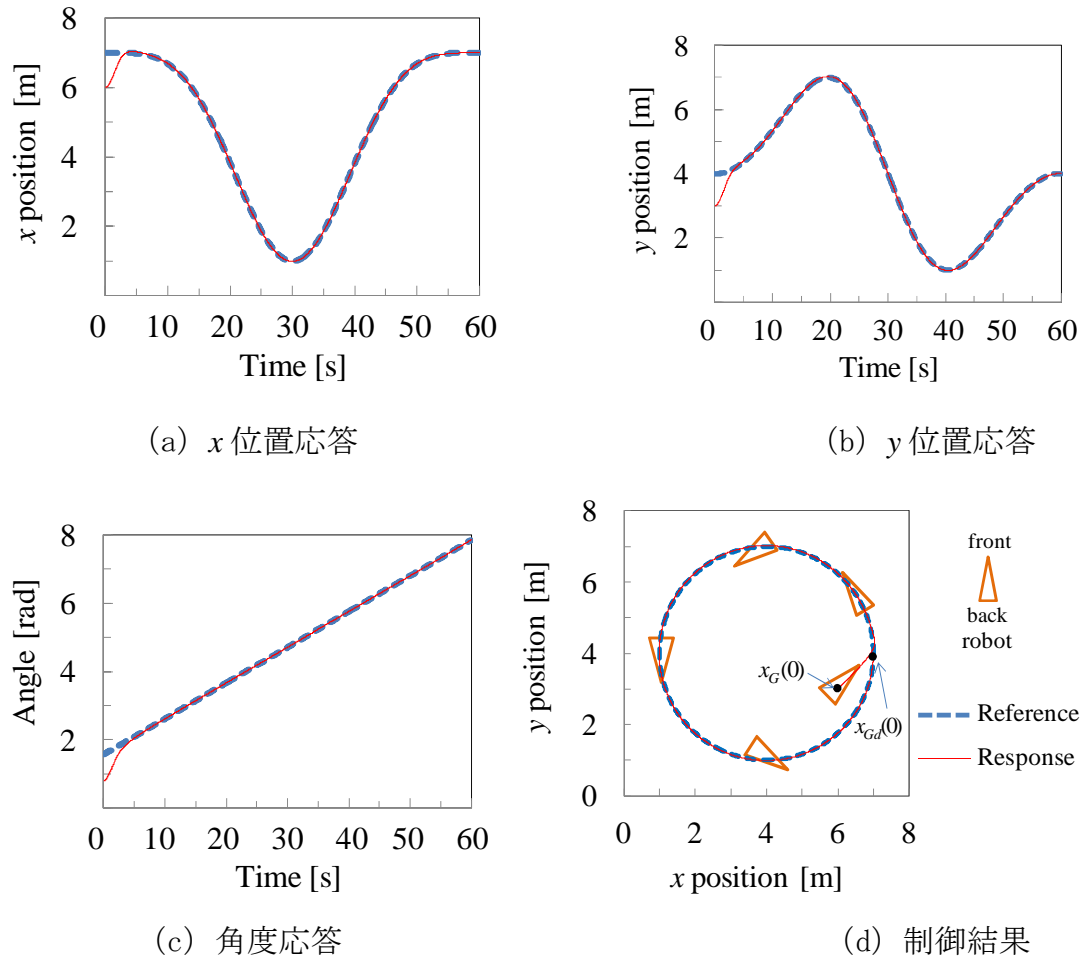


図 2.6 制御結果-荷重あり

経路追従精度を評価するために、評価誤差を、目標軌道と制御結果との間の面積を経路の長さで割った式 (2.20) と定義する.

$$E = \frac{\int_{x_s}^{x_e} |y_{Gd} - y_G| dx_G}{l} \quad (2.20)$$

表 2.2 は評価誤差を示したものである. 図 2.5 で, 荷重  $m=0\text{kg}$ , 重心ずれ  $r_0=0.00\text{m}$  の場合における 5s から 60s までの評価誤差は  $0.002\text{m}$  である. 図 2.6 で, 荷重  $m=60\text{kg}$ , 重心ずれ  $r_0=0.30\text{m}$  の場合における 5s から 60s まで評価誤差は  $0.007\text{m}$  である. 荷重なしの場合は荷重ありの場合より評価誤差が  $0.005\text{m}$  増えるが, 荷重変化と重心ずれに対して精度よく追従したことが分かる.

表 2.2 経路追従誤差

条件	誤差(m)
$m = 0 \text{ kg}, r_0 = 0.00 \text{ m}$	0.002
$m = 60 \text{ kg}, r_0 = 0.30 \text{ m}$	0.007

### 【パラメータの影響】

適応制御パラメータ( $\lambda$ と $K$ )を調整することで、誤差を軽減することができる[7]．パラメータ $\Gamma$ は、推定則を調整するパラメータである．パラメータ $\lambda$ と $K$ を再設定せず、

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

とした場合における推定パラメータ $\hat{\alpha}$ が変化の様子は図 2.7 のようになり、追従結果を図 2.8 に示す．パラメータが最適値から多少のずれがあるため、経路が目標経路から少し外れている．表 2.3 を見ると分かるように適応制御では、パラメータが常に最適値に維持される場合、追従精度に大幅な改善がみられる．

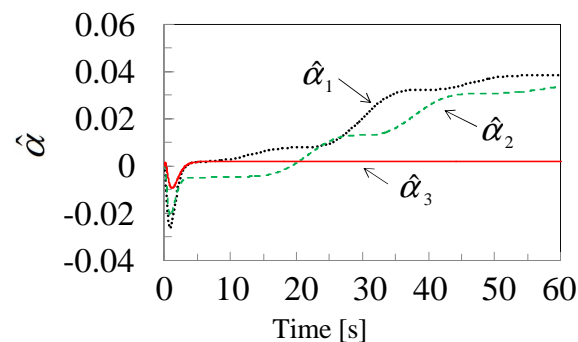


図 2.7 パラメータ収束

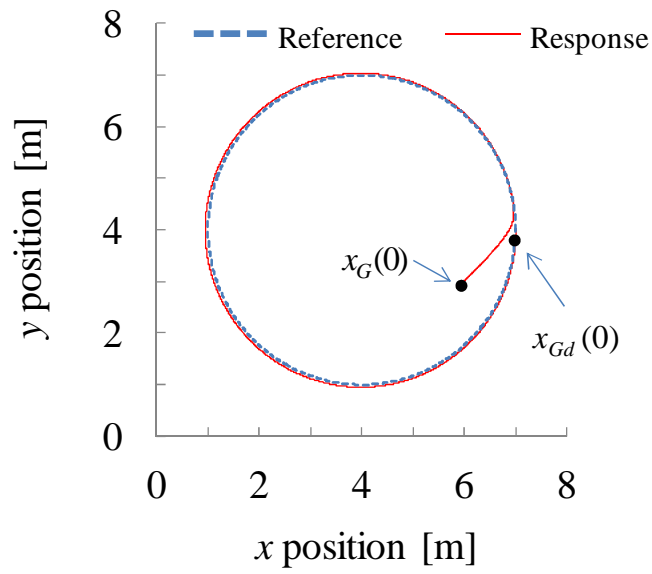


図 2.8 適応制御結果

表 2.3 経路追従誤差

	適応制御パラメータ	
	$\Gamma = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix},$ $\lambda = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix},$ $K = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$	$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0003 \end{bmatrix},$ $\lambda = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix},$ $K = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}$
$m = 0 \text{ kg}$ $r_0 = 0.00 \text{ m}$	0.02m	0.002m

### 【慣性マトリクス要素の時変性について】

提案した適応制御法は，慣性マトリクス  $\dot{M}_0 = 0$  と仮定する場合，システムが安定すると認められる．本節では，荷重の変化と重心の移動が時変の時，提案した適応制御法の有効性について説明する．

目標経路と適応制御パラメータの設定値については前に示した値とする．付加荷重と重心移動は式 (2.21) で示された値とする．

$$\begin{aligned} m &= 30 + 30\sin(wt) \\ r_0 &= 0.15 + 0.15\sin(wt) \end{aligned} \quad (2.21)$$

ただし，  $w = 2\pi/60$  .

シミュレーション結果は，図 2.9 と図 2.10 に表す．図 2.9 より，荷重と重心が緩やかに変化するとき，推定則の結果は実際の値の近くであるため，良く制御することができる．図 2.10 に示した経路においても良く追従していることが確認できる．

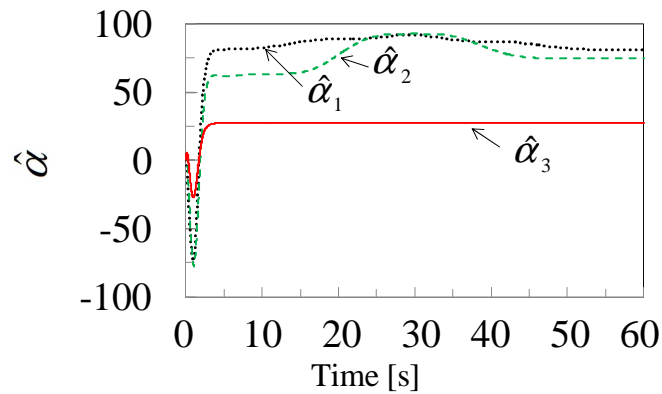


図 2.9 パラメータの収束



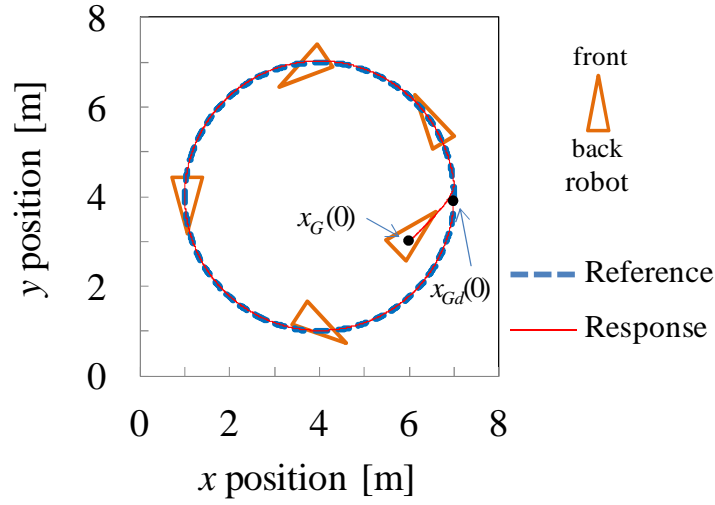


図 2.10 適応制御結果

安定性解析の時に、 $\dot{M}_0 = 0$ と仮定した． $\dot{M}_0 \neq 0$ の時，式 (2.13) の時間微分を求め，式 (2.10) と式 (2.11) を利用して以下の式を得る．

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= S^T M_0 \dot{S} + \frac{1}{2} S^T \dot{M}_0 S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \dot{\alpha} \\
 &= -S^T K S - S^T (\hat{M}_0 - M_0) [\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\alpha} + \frac{1}{2} S^T \dot{M}_0 S \\
 &= -S^T K S + \frac{1}{2} S^T \dot{M}_0 S \\
 &= -S^T (K - \frac{1}{2} \dot{M}_0) S
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

$K - \frac{1}{2} \dot{M}_0$  は，正定対角行列を満たすように制御することにより，常に $\dot{V}(t)$ の値を非正にすることができる．

式 (2.21) により，

$$\dot{M}_0 = \begin{bmatrix} 30w \cos wt & 0 & 0 \\ 0 & 30w \cos wt & 0 \\ 0 & 0 & 0.15w \cos wt \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

したがって，

$$\dot{V}(t) = -S^T \left( K - \frac{1}{2} \dot{M}_0 \right) S \leq 0 \quad (2.24)$$

これより  $V(t)$  はリアプノフ関数である。したがって、 $t \rightarrow \infty$  のとき  $s \rightarrow 0$  となることがわかる。これは

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

から  $t \rightarrow \infty$  のとき  $e \rightarrow 0$ 、 $\dot{e} \rightarrow 0$  となることを意味する。

### 【目標軌道による影響】

適応制御のパラメータは目標軌道の変化に影響されるかを調査するため、前節に調整した適応制御のパラメータ（式 2.19）を用いて、目標軌道（式 2.18）における異なるパラメータ  $a$  と  $b$  に対して、無荷重の場合のシミュレーションを行う。目標軌道のパラメータ設定は次の通りである。

①  $a = -3.4 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{m/s}^3$  と  $b = 5.1 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{m/s}^2$

②  $a = -1.1 \times 10^{-1} \text{ rad} \cdot \text{m/s}^3$  と  $b = 1.1 \text{ rad} \cdot \text{m/s}^2$

$a$  と  $b$  の値は①のように設定する場合、シミュレーション時間  $t=150\text{s}$  で、結果は図 2.11 に示す。経路良く追従できることが分かる。②の場合は、シミュレーション時間  $t=10\text{s}$  で、適応制御結果は図 2.12 に表す。歩行訓練機の経路追従誤差は大きくなっている。

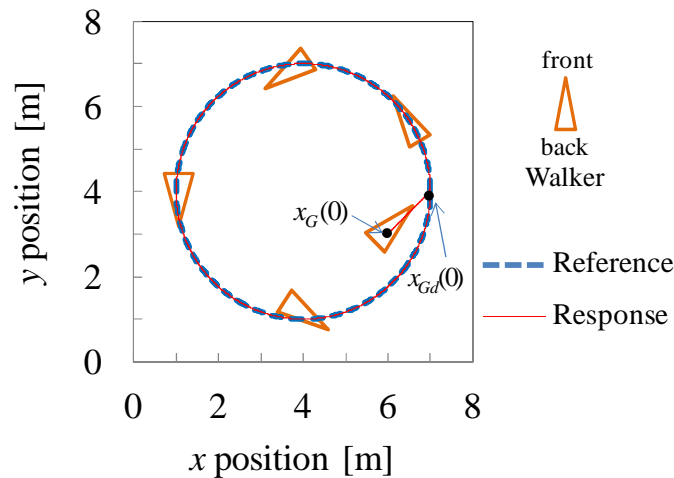
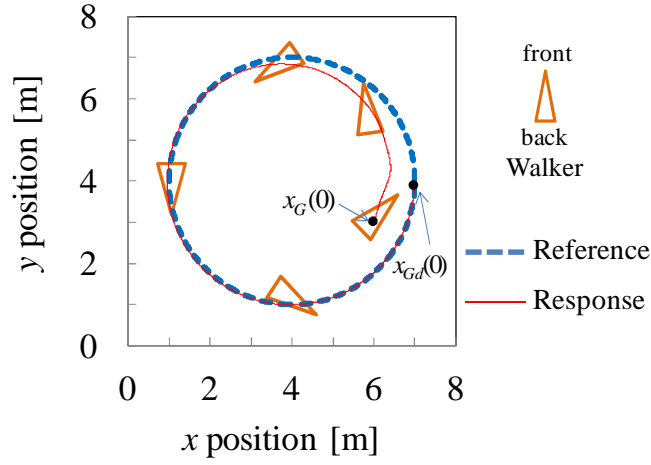
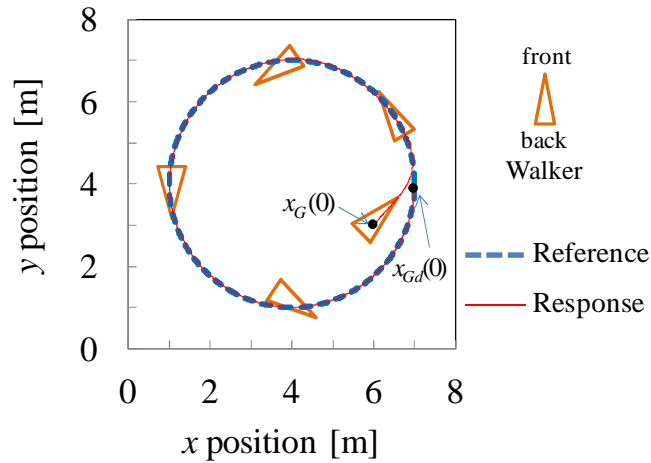


図 2.11 適応制御結果 ( $t=150\text{s}$ )


 図 2.12 適応制御結果 ( $t=10s$ )

②の場合において、より良い追従結果を得られるために、適応制御のパラメータを再設定することが必要である。試行錯誤し調整した結果は図 2.13 に示し、その時の適応制御のパラメータは、次の通りである。

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 & 0 \\ 0 & 0.003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.003 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} 2.0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.2 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 180 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$


 図 2.13 適応制御結果 ( $t=10s$ )

適応制御のパラメータは荷重変化と重心ずれに対応できるが、目標軌道の変化に対応できない。しかし、目標軌道②の場合、式 (2.19) に示す適応制御の

パラメータを利用する時、経路良く追従できた。したがって、適応制御のパラメータを目標軌道に応じて適切に設定すれば、経路追従制度がよくなる。

### 【従来制御との比較】

経路追従精度の向上についての有効性を確かめるため、歩行訓練機を円形経路に追従させ、PID 制御と提案した適応制御との比較を行う。PID 制御結果を図 2.14 に示す。横軸は  $x$  方向距離であり、縦軸は  $y$  方向距離である。破線は目標経路で、実線は荷重なしの場合における応答であり、点線は荷重ありの場合における応答である。初期位置は  $x_G(0)$  とする。目標軌道を式 (2.18) に示す。PID 制御のパラメータは荷重なしの場合に、試行錯誤で調整した。

円形経路に追従する時、PID 制御で荷重なしの場合、経路が目標経路から外れている。また、荷重ありの場合では経路追従誤差はより大きくなる。PID 制御における  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  方向の制御量は、歩行訓練機のおムニホール 1, 2, 3, 4 に直接入力される。しかし、歩行訓練機は非線形システムである、即ち、入力行列に時変角度  $\theta$  が存在する。そのため、PID 制御のパラメータを調整する時には位置と姿勢角度との間に相互の影響があるため、より良い制御効果を得るのは困難である[8]。

歩行訓練機の非線形システムに対して、非線形適応制御法を導入することで、図 2.5 と図 2.6 に示すように、経路追従精度が大幅に改善された。一方、PID 制御法は、制御パラメータにより制御系は不安定である可能性がある。適応制御法は、制御パラメータが正定対角行列であれば、制御系は漸近的安定であることが保証できる。以上により提案した非線形適応制御法の有効性が確認された。

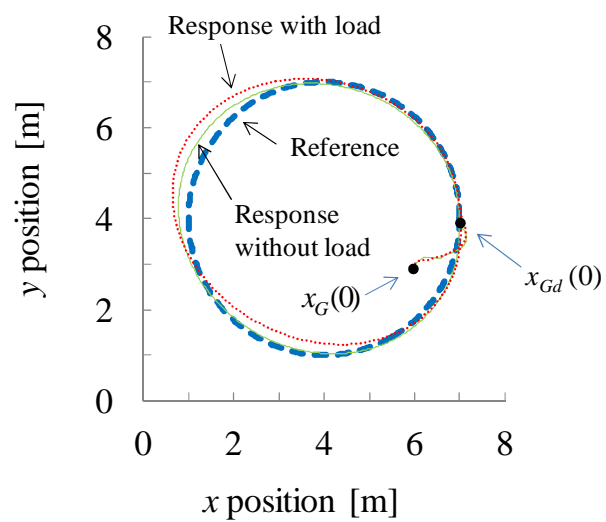


図 2.14 PID 制御の結果

## 2.5 結言

本章では、荷重変化と重心移動を考慮した、全方向移動型歩行訓練機を対象に数学モデルを導出して適応制御法を開発した。

要訓練者が全方向移動型歩行訓練機で歩行訓練する場合、歩行訓練機が歩行訓練経路から離すと言う問題が生じる。この問題に対して、全方向移動型歩行訓練機の中心と重心が同じ位置にすると単純化し、要訓練者の肘かけ方による重心の移動に対して座標系とパラメータを定義し、荷重変化と重心移動を考慮した適応制御法を開発した。

提案した適応制御法を用いて、シミュレーションを行い、推定ゲインが零の状態から最適値に収束する結果より、適応制御が動作していることが確認できた。シミュレーションでは、無荷重の時、精度よく追従結果を得られるために、適応制御のパラメータを調整する。調整したパラメータを用いて、荷重掛け重心がずれた場合においても、目標経路と軌道に精度よく追従することができる。本手法は経路追従精度の向上についての効果が確認できた。

開発した非線形適応制御法では、制御対象の慣性マトリクスの情報を知らなくても、運動制御ができる。安定性証明の時、この慣性マトリクスの微分は、零になると考えている。即ち、制御対象のシステムパラメータは、計算周期中は変化しないものとして、システムは安定であることが証明された。システムパラメータは低周波で変化すれば、システムは収束することができる。原因としては、システムの特性が緩やかに変化して、高速で同定されるパラメータ値を用いて運動制御を行うからである。理論的な証明により、適切な適応制御パラメータを選択すれば、制御システムの安定性を保証することができる。シミュレーション結果により、システムパラメータが変動しても、高精度で制御効果を得られることが分かった。

提案した手法の有効性を確認するために、PID 制御との比較を行った。シミュレーション結果により、従来の PID 制御法は、歩行訓練機の非線形に対応できないことが分かった。荷重変化する場合、PID 制御法で、経路追従誤差が大きく

なる．したがって，開発した適応制御法は，歩行訓練機の制御法として荷重変化と重心ずれに対応する経路追従精度の向上に有効であることが確認された．

## 参考文献

1. R.F. Stengel: Optimal Control and Estimation, Dover Publications, Inc., New York, 1994.
2. P. Pannil, K. Tirasesth, P. Ukakimaparn and T. Trisuwannawat: Derivative State Constrained Optimal H2 Control For Unstable Systems, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol. 5, no. 10(B), pp. 3541-3552, 2009.
3. J.A. Shaw: The PID Control Algorithm, Process Control Solutions, New York, 2003.
4. G. Tao: Adaptive Control Design and Analysis, Univ. of Virginia, Charlottesville, Virginia, USA, 2003.
5. D.N. Kouya and F.A. Okou: Adaptive Backstepping Control of a Wheeled Mobile Robot, 17th Mediterranean Conf. on Control and Automation, Thessaloniki, pp. 85-91, 2009.
6. J. J. Slotine and W. Li: Applied Nonlinear Control, Mill Valley, CA, Prentice Hall, 1991.
7. 譚 仁鵬, 王 碩玉, 姜 銀来, 石田 健司, 藤江 正克: 適応制御法に基づく全方向移動型歩行訓練機の運動制御, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集, pp. 514-515, 2010.
8. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. Nagano: Adaptive Controller for Motion Control of an Omni-directional Walker, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 156-161, China, 2010.



## 第3章

# 中心と重心が異なる平面モデル2とその制御法

### 3.1 緒言

全方向移動型歩行訓練機を用いて歩行訓練を行う時、要訓練者の肘の掛けかたの影響で歩行訓練機システムの荷重変化と重心移動問題があるため、システムのパラメータが変化する。この問題の解決手段として、第二章には、重心と中心は同じ位置にいるとしてモデルを単純化し、適応制御法を開発した。シミュレーションにより、提案した適応制御法の有効性を確認した。

しかし、全方向移動型歩行訓練機は構造上対称であるが、バッテリーや制御基板は前部に配置しているので、実際に歩行訓練機の重心は前寄りである。理学療法士の訓練メニューを実施する時、要訓練者は歩行訓練機の中心に追従していくため、中心の位置を目標経路に追従させればよい。より高精度で歩行訓練機を制御するために、実際の歩行訓練機に合う数学モデルを導出する必要がある。そこで、本章では、歩行訓練機の中心位置を考えて、荷重変化と重心移動に対する動力学式を導出し、その動力学式に基づいて適応制御法を改善する。荷重なしと荷重ありの場合、シミュレーションによって改善した非線形適応制御法を検証する[1, 2]。

### 3.2 中心と重心が異なる平面モデル2

前章には，歩行訓練機の重心と中心は同じ位置にあるとして平面モデル1を導出し，運動制御法を提案した．しかし，歩行訓練機の実機では，重心は中心からずれている．より高精度で制御するために，実際の歩行訓練機に合う数学モデルを導出する必要がある．本節では，荷重変化と重心ずれを考慮して，中心に着目し，歩行訓練機の重心が中心からずれる時の数学モデルを導出する．

#### 【運動学】

全方向移動型歩行訓練機の運動学について述べる．二次元における直交座標系  $o-xy$  には，歩行訓練機の重心ずれを考慮した座標系の設定と構造モデルを図3.1に示す．

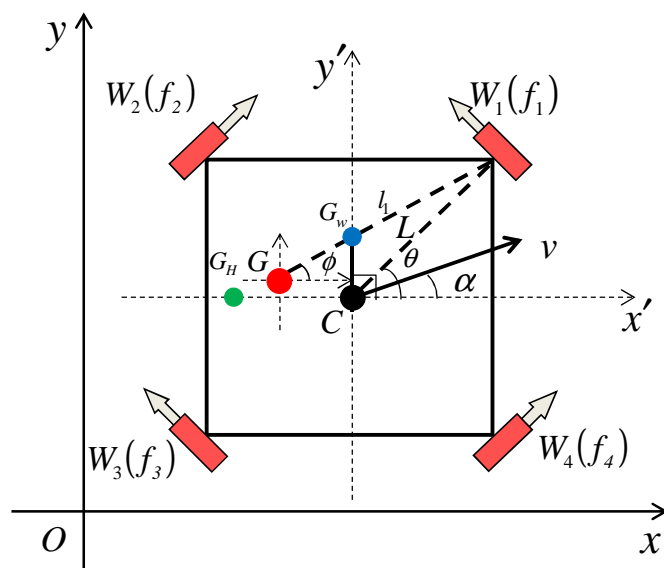


図 3.1 座標系の設定と構造モデル

図3.1には，四つの赤い長方形はオムニホイールを表す． $C$ は，歩行訓練機の中心位置であり， $G_w$ は歩行訓練機の重心位置であり， $G_H$ は要訓練者の等価負荷重心であり， $G$ は歩行訓練機の自重と要訓練者からの等価荷重を含めたシステムの重心である．表3.1に各パラメータの定義を示す．

表 3.1 歩行訓練機のパラメータ

パラメータ	単位	説明
$f_i$	[N]	オムニホイール $i$ の駆動力( $i=1,2,3,4$ )
$v$	[m/s]	歩行訓練機の世界速度
$\alpha$	[rad]	$x'$ と $v$ の成す角度
$r_0$	[m]	$C$ と $G$ の距離
$I'$	[kg・m <sup>2</sup> ]	システムの慣性モーメント
$M$	[kg]	歩行訓練機本体の質量
$m$	[kg]	要訓練者の等価負荷
$L$	[m]	$C$ とオムニホイールの距離
$\theta_i$	[rad]	$x'$ 軸と $CW_i$ の成す角度( $i=1,2,3,4$ )
$l_i$	[m]	重心 $G$ とオムニホイール $i$ の距離
$\phi_i$	[rad]	$x'$ 軸と $GW_i$ の成す角度( $i=1,2,3,4$ )
$\beta$	[rad]	$x'$ 軸と $CG$ の成す角度

図 3.1 に示した歩行訓練機のモデルにより，中心の世界速度及び角速度から，各オムニホイールの世界速度を求めることができる．各オムニホイールの世界速度  $v_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) と中心位置  $C(x_c, y_c)$  との関係は，式(3.1)で表せる．

$$K_c \begin{bmatrix} \dot{x}_c & \dot{y}_c & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

ただし， $\theta$  は， $x'$  軸と  $CW_1$  の成す角度．即ち， $\theta = \theta_1$ ．歩行訓練機の構造に基づいて，次の式は成立する． $\theta_2 = \theta + \pi/2$ ， $\theta_3 = \theta + \pi$ ， $\theta_4 = \theta + 3\pi/2$ ．マトリックス  $K_c$  は下記の通りである．

$$K_c = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & L \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & -L \\ \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & -L \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & L \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

一方，歩行訓練機の重心について速度ベクトルと各オムニホイールの世界速度  $v_i$  との逆運動学式は式(3.3)に示す．

$$K_G \begin{bmatrix} \dot{x}_G & \dot{y}_G & \dot{\phi} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{bmatrix}^T \quad (3.3)$$

ただし、マトリックス  $K_G$  は下記のようになる。

$$K_G = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & l_1 \cos(\theta_1 - \phi_1) \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & -l_2 \cos(\theta_2 - \phi_2) \\ \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & -l_3 \cos(\theta_3 - \phi_3) \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & l_4 \cos(\theta_4 - \phi_4) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ただし、

$$l_1 = \frac{L \sin \theta_1 - y_G}{\sin \phi_1}, \quad l_2 = \frac{L \sin \theta_2 - y_G}{\sin \phi_2}, \quad l_3 = \frac{L \cos \theta_3 - x_G}{\cos \phi_3}, \quad l_4 = \frac{L \sin \theta_4 - y_G}{\sin \phi_4}.$$

$$\tan \phi_i = \frac{L \sin \theta_i - y_G}{L \cos \theta_i - x_G} \quad (i=1,2,3,4)$$

更に、歩行訓練機の中心位置の運動学式(3.1)と重心位置の運動学式(3.3)から、重心位置と中心位置との関係は式(3.5)と表すことができる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_G & \dot{y}_G & \dot{\phi} \end{bmatrix}^T &= (K_G^T \cdot K_G)^{-1} \cdot K_G^T \cdot \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{bmatrix}^T \\ &= (K_G^T \cdot K_G)^{-1} \cdot K_G^T \cdot K_C \begin{bmatrix} \dot{x}_C & \dot{y}_C & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

次の記号を用いると簡単に表すことができる。

$$\dot{X}_G = K' \cdot \dot{X} \quad (3.6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \dot{X}_G &= \begin{bmatrix} \dot{x}_G & \dot{y}_G & \dot{\phi} \end{bmatrix}^T, \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_C & \dot{y}_C & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T, \\ K' &= (K_G^T \cdot K_G)^{-1} \cdot K_G^T \cdot K_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2}[\sin \theta \cdot (l'_1 - l'_3) + \cos \theta \cdot (l'_2 - l'_4)] \\ 0 & 1 & \frac{1}{2}[\sin \theta \cdot (l'_2 - l'_4) - \cos \theta \cdot (l'_1 - l'_3)] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ l'_1 &= l_1 \cos(\theta_1 - \phi_1), \quad l'_2 = l_2 \cos(\theta_2 - \phi_2), \\ l'_3 &= l_3 \cos(\theta_3 - \phi_3), \quad l'_4 = l_4 \cos(\theta_4 - \phi_4). \end{aligned}$$

### 【動力学】

図 3.1 に示した歩行訓練機のモデルによって次に動力学方程式を導出する．  
動力学方程式は式 (3.7) と表すことができる．

$$\begin{cases} (M + m) \ddot{x}_G = -f_1 \sin \theta_1 + f_2 \sin \theta_2 + f_3 \sin \theta_3 - f_4 \sin \theta_4 \\ (M + m) \ddot{y}_G = f_1 \cos \theta_1 - f_2 \cos \theta_2 - f_3 \cos \theta_3 + f_4 \cos \theta_4 \\ I' \ddot{\phi} = l'_1 f_1 - l'_2 f_2 - l'_3 f_3 + l'_4 f_4 \end{cases} \quad (3.7)$$

ただし， $I'$  と  $m$  は要訓練者の体重と肘の掛け方により変わる．システムの入力は  $f_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) であり，出力は重心の加速度  $\ddot{X}_G$  である．動力学方程式 (3.7) を式 (3.8) のような行列方程式にまとめる．

$$M_0 \ddot{X}_G = K_G^T F \quad (3.8)$$

ただし，

$$\begin{aligned} \ddot{X}_G &= [\ddot{x}_G \quad \ddot{y}_G \quad \ddot{\phi}]^T \\ F &= [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T \\ M_0 &= \begin{bmatrix} M + m & 0 & 0 \\ 0 & M + m & 0 \\ 0 & 0 & I' \end{bmatrix} \\ K_G^T &= \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \sin \theta_3 & -\sin \theta_4 \\ \cos \theta_1 & -\cos \theta_2 & -\cos \theta_3 & \cos \theta_4 \\ l_1 \cos(\theta_1 - \phi_1) & -l_2 \cos(\theta_2 - \phi_2) & -l_3 \cos(\theta_3 - \phi_3) & l_4 \cos(\theta_4 - \phi_4) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(3.6) を式 (3.8) に代入することで，中心に着目した動力学方程式が得られ，  
具体的には式 (3.9) となる．歩行訓練機の中心の加速度と，各オムニホイールに加わる力との逆動力学関係を示している． $K_G^T$  と  $K'$  は時変パラメータ  $\theta$  に関する行列で，式 (3.9) より歩行訓練機システムは非線形システムであることが分かる．

$$M_0 \cdot K' \cdot \ddot{X} + M_0 \cdot \dot{K}' \cdot \dot{X} = K_G^T \cdot F \quad (3.9)$$

### 3.3 非線形適応制御法の改善

歩行訓練機の動力学方程式は、非線形性の強い複雑な構造になっていることを前節で述べた。本節では、動力学方程式 (3.9) に基づいて、歩行訓練機のパラメータ変動に対して、非線形適応制御法を改善する[3]。

#### 【制御則設計】

適応制御法の制御則と推定則を式 (3.10) と式 (3.11) のように与える。

$$F = K_G (K_G^T K_G)^{-1} [\hat{M}_0 (A' \ddot{X} + \dot{K}' \dot{X} + \ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + KS] \quad (3.10)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = \Gamma^{-1} HS \quad (3.11)$$

ただし、

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

$$e = X_d - X$$

$$e = [e_x, e_y, e_\theta]^T$$

$$X = [x_c, y_c, \theta]^T$$

$$X_d = [x_{cd}, y_{cd}, \theta_d]^T$$

$$\hat{M}_0 = \begin{bmatrix} \hat{M} + \hat{m} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{M} + \hat{m} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{I}' \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2} [\sin \theta \cdot (l'_1 - l'_3) + \cos \theta \cdot (l'_2 - l'_4)] \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} [\sin \theta \cdot (l'_2 - l'_4) - \cos \theta \cdot (l'_1 - l'_3)] \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} \dot{p}\dot{\theta} + p\ddot{\theta} + \ddot{x}_{cd} + \lambda_1 \dot{e}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}\dot{\theta} + q\ddot{\theta} + \ddot{y}_{cd} + \lambda_2 \dot{e}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddot{\theta}_d + \lambda_3 \dot{e}_3 \end{bmatrix}$$

$$p = \frac{1}{2} [\sin \theta \cdot (l'_1 - l'_3) + \cos \theta \cdot (l'_2 - l'_4)]$$

$$q = \frac{1}{2}[\sin \theta \cdot (l'_2 - l'_4) - \cos \theta \cdot (l'_1 - l'_3)]$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$\lambda$ ,  $K$ ,  $\Gamma$ は正定対角行列で、制御システムのパラメータである。次に、この制御システムは安定であり、目標軌道追従誤差は零に収束することを証明する。

### 【安定性分析】

推定誤差：

$$\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha \quad (3.13)$$

正定関数：

$$V(t) = \frac{1}{2}[S^T M_0 S + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \alpha] \quad (3.14)$$

この関数の時間微分を求め、 $\dot{M}_0 = 0$ を利用して (3.15) を得る。 $\dot{M}_0 = 0$ は、歩行訓練機のパラメータは一回の歩行訓練において不変であるという意味である。

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T M_0 \dot{S} + \Delta^T \alpha \Gamma \Delta \dot{\alpha} \\ &= S^T M_0 (\ddot{X}_d - \ddot{X} + \lambda \dot{e}) + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\hat{\alpha}} \\ &= -S^T [(M_0 \ddot{X} - M_0 (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e}))] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\hat{\alpha}} \\ &= -S^T [(M_0 K' - M_0 A') \ddot{X} - M_0 (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e})] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\hat{\alpha}} \\ &= -S^T [K_G^T F - M_0 \dot{K} \dot{X} - M_0 A' \ddot{X} - M_0 (\ddot{X}_d + \lambda \dot{e})] + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\hat{\alpha}} \\ &= -S^T K S - S^T (\hat{M}_0 - M_0)(A' \ddot{X} + \dot{K} \dot{X} + \ddot{X}_d + \lambda \dot{e}) + \Delta^T \alpha \Gamma \dot{\hat{\alpha}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

推定則式 (3.11) を代入する。

$$\dot{V}(t) = -S^T K S \leq 0 \quad (3.16)$$

ただし,  $X_d$  は目標軌道である.  $M_0$  の推定値を  $\hat{M}_0$  と表す.  $A = M_0 K' - M_0$

$V(t)$  はリアプノフ関数である. したがって,  $t \rightarrow \infty$  につれ  $S \rightarrow 0$  となることが分かる. これは  $S = \dot{e} + \lambda e$  から  $t \rightarrow \infty$  につれ  $e \rightarrow 0$ ,  $\dot{e} \rightarrow 0$  となることを意味する. システムは漸近的安定であることが証明した. 即ち, 誤差  $e$  ゼロへ収束する.



### 3.4 シミュレーションによる検討

上記の制御法を用いて、無荷重と荷重掛ける場合シミュレーションを行い、提出した非線形適応制御法の有効性を検討する。

#### 【目標経路】

目標経路の設定について説明する。歩行訓練機で訓練する時、要訓練者の乗心地を考慮し、加速度が緩やかに変化させた方がいい。その目標関数の設定は次の手順で行っている。

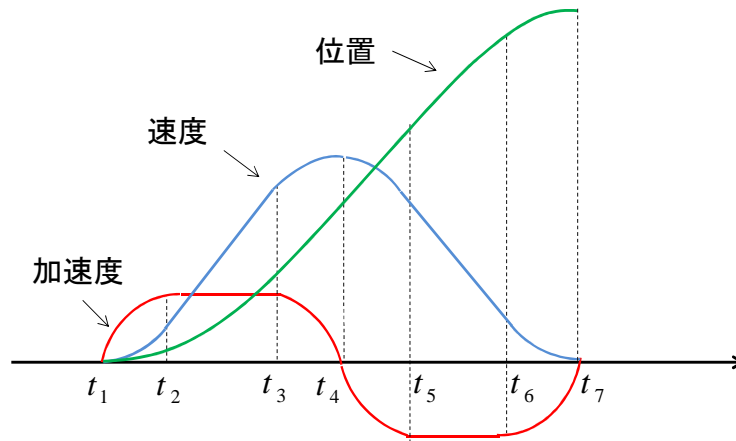


図 3.2 目標軌道

加速度：

$$\ddot{d}(t) = \begin{cases} A \sin[w(t-t_1)], & t_1 \leq t \leq t_2 \\ A, & t_2 \leq t \leq t_3 \\ A \cos[w(t-t_3)], & t_3 \leq t \leq t_4 \\ -A \sin[w(t-t_4)], & t_4 \leq t \leq t_5 \\ -A, & t_5 \leq t \leq t_6 \\ -A \cos[w(t-t_6)], & t_6 \leq t \leq t_7 \end{cases} \quad (3.17)$$

ただし,

$$A = 0.00738, \quad \omega = \pi/8,$$

$$t_1 = 0, \quad t_2 = 4, \quad t_3 = 26, \quad t_4 = 30, \quad t_5 = 34, \quad t_6 = 56, \quad t_7 = 60$$

式 (3.17) より計算した位置は, 式 (3.18) になる.

$$d(t) = \begin{cases} \frac{A}{w}(t-t_1) - \frac{A}{w^2} \sin[w(t-t_1)], & t_1 \leq t \leq t_2 \\ D_2(t_2) + \frac{A}{w}(t-t_2) - At_2(t-t_2) + \frac{A}{2}(t^2-t_2^2), & t_2 \leq t \leq t_3 \\ D_3(t_3) + A\left(\frac{1}{w} + t_3 - t_2\right)(t-t_3) - \frac{A}{w^2} \cos[w(t-t_3)] + \frac{A}{w^2}, & t_3 \leq t \leq t_4 \\ D_4(t_4) + A\left(\frac{1}{w} + t_3 - t_2\right)(t-t_4) + \frac{A}{w^2} \sin[w(t-t_4)], & t_4 \leq t \leq t_5 \\ D_5(t_5) + A\left(\frac{1}{w} + t_3 - t_2\right)(t-t_5) + At_5(t-t_5) - \frac{A}{2}(t^2-t_5^2), & t_5 \leq t \leq t_6 \\ D_6(t_6) + \frac{A}{w}(t-t_6) + \frac{A}{w^2} \cos[w(t-t_6)] - \frac{A}{w^2}, & t_6 \leq t \leq t_7 \end{cases} \quad (3.18)$$

目標経路は正方形であり, 歩行機の向き  $\theta$  は  $45^\circ$  である. その目標軌道の設計は式 (3.19) のようになる.

$$\begin{cases} \begin{cases} x_d(t) = d(t) + 2 \\ y_d(t) = 2 \end{cases} & (0s \leq t \leq 60s) \\ \begin{cases} x_d(t) = 8 \\ y_d(t) = d(t) + 2 \end{cases} & (60s \leq t \leq 120s) \\ \begin{cases} x_d(t) = 8 - d(t) \\ y_d(t) = 8 \end{cases} & (120s \leq t \leq 180s) \\ \begin{cases} x_d(t) = 2 \\ y_d(t) = 8 - d(t) \end{cases} & (180s \leq t \leq 240s) \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\theta_d(t) = \frac{\pi}{2}$$

目標経路は図 3.3 になる.

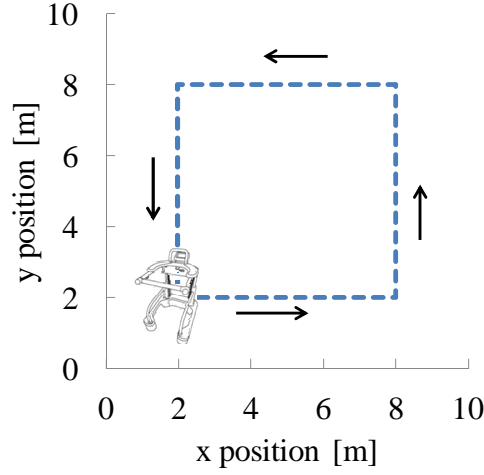


図 3.3 目標経路

#### 【初期設定】

初期条件は  $x_G(0)=1m$ ,  $y_G(0)=1m$ ,  $\theta(0)=60^\circ$  である．適応制御のパラメータは荷重なしの場合，試行錯誤を行いマニュアルで調整している．値は下記の通りである．

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.00003 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000013 \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

#### 【荷重変化への対応】

荷重なしと荷重ありの場合，適応制御法を用いてシミュレーションを行った結果を，それぞれ図 3.4 と図 3.5 に示す．

図 3.4 は，荷重  $m=0kg$  時のシミュレーションである．その時，歩行訓練機の重心位置は中心から  $0.16m$  ずれている，即ち  $r_0=0.16m$ ,  $\beta=90^\circ$ ．図 3.4(a) では，適応制御で推定したパラメータが零から始めて最適値に収束する様子を示す．質量に関するパラメータ  $\hat{\alpha}_1$  と  $\hat{\alpha}_2$  が  $58kg$  へ収束し，慣性モーメントに関するパラメータ  $\hat{\alpha}_3$  が 10 秒程度で最適値  $27.7kg \cdot m^2$  に収束する．適応制御が動作していることが確認できる．

図 3.4(b)では、横軸は時間、破線は  $x$  横軸の目標軌道、実線は  $x$  横方向における歩行訓練機の位置応答を表す。図 3.4(c)では、横軸は時間、破線は  $y$  縦軸の目標軌道、実線は  $y$  縦方向における歩行訓練機の位置応答を表す。図 3.4(d)では、横軸は時間、破線は本体の向き角度の目標軌道、実線は角度における歩行訓練機の向きの角度応答を表す。歩行訓練機は  $x$  方向にだけでなく、 $y$  方向と本体の向き角度も 10 秒程度で目標軌道に追従することができる。

また、経路精度の向上についての効果を確認するため、経路追従の結果を図 3.4(e)に示す。図 3.4(e)では、横軸は  $x$  横軸の位置応答、縦軸は  $y$  縦軸の位置応答、破線は目標軌道、実線は歩行訓練機の位置応答を表す。三角形は歩行訓練機の本体の向き角度を表す。正方形の経路に精度よく追従したことが分る。

図 3.5 は荷重ありの場合、即ち  $m=60\text{kg}$ 、 $r_0=0.30\text{m}$  と  $\beta=140^\circ$  のシミュレーション結果を表したものである。図 3.5 の座標の設定は図 3.4 と同じである。図 3.5 (a) に示すような位置フィードバックを繰り返すことにより、推定パラメータの適応処理を行い、60 秒程度で完全に真値に収束する。適応制御パラメータ  $\Gamma$  より、収束速度が異なることを第二章にのべる。図 3.5 (b) と図 3.5 (c) と図 3.5 (d) より、初期誤差があっても、10 秒程度で目標軌道へ追従できることが分かる。図 3.5 (e) に、経路追従の結果を表す。図 3.4 (e) とほぼ同じ経路追従結果を得られる。体重が違っても重心ずれがあっても精度よく追従したことが分かる。

経路追従精度を評価するために、評価誤差を、目標経路と制御した経路との間の面積割る経路の長さとして定義する。

$$E = \frac{\int_{x_s}^{x_e} |y_{Gd} - y_G| dx_G}{l} \quad (3.21)$$

図 3.4 では荷重  $m=0\text{kg}$ 、重心ずれ  $r_0=0.16\text{m}$  の場合、10 s から 150 s まで評価、誤差は 0.020m である。図 3.5 では荷重  $m=60\text{kg}$ 、重心ずれ  $r_0=0.30\text{m}$  場合の結果である。この時、10 s から 150 s まで評価誤差は 0.021m である。荷重変化と重心ずれの時、精度よく追従したことが分かる。これにより、提案した適応制御法は、異なる荷重と重心ずれに対処することができることが確認された。

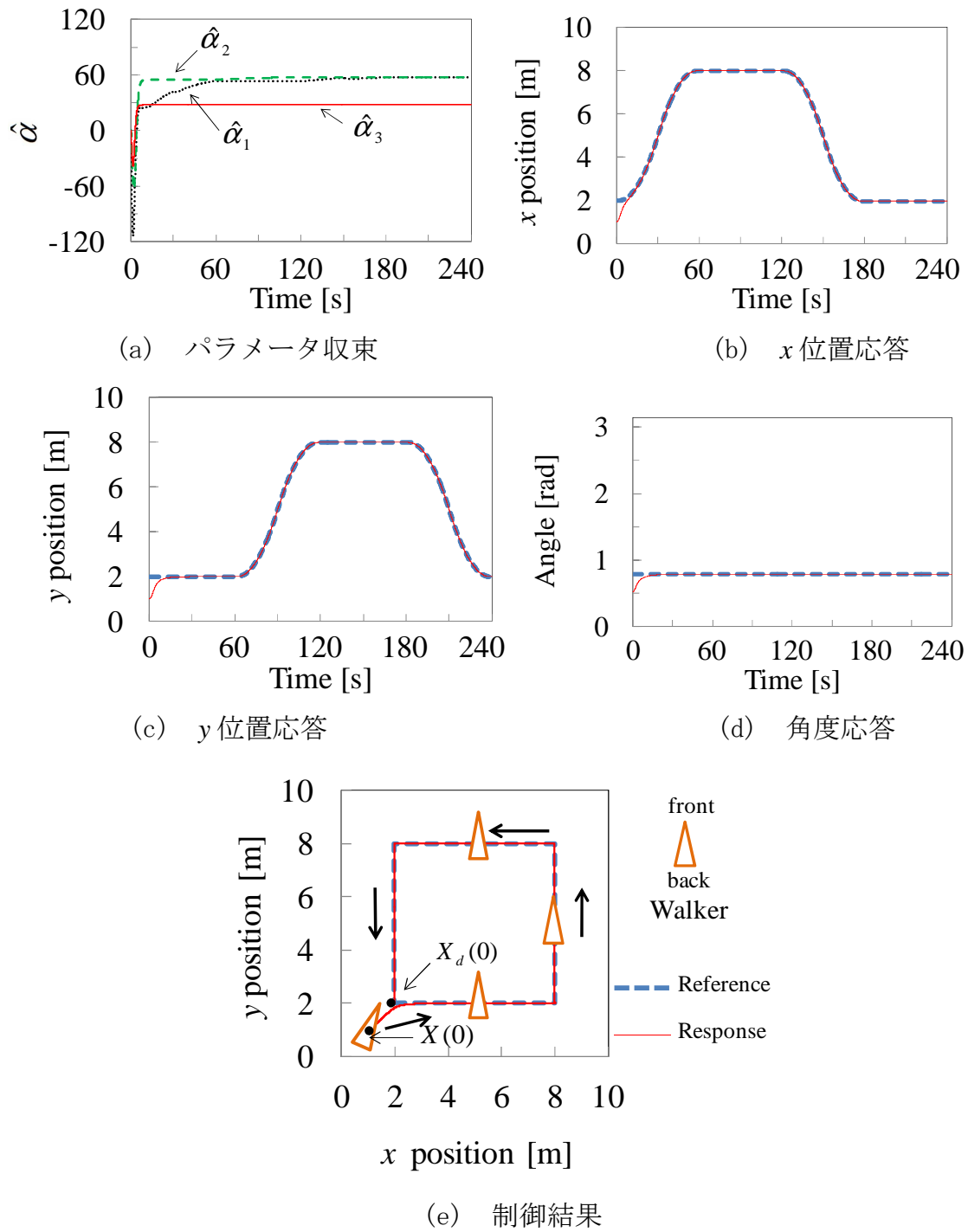


図 3.4 制御結果-荷重なし

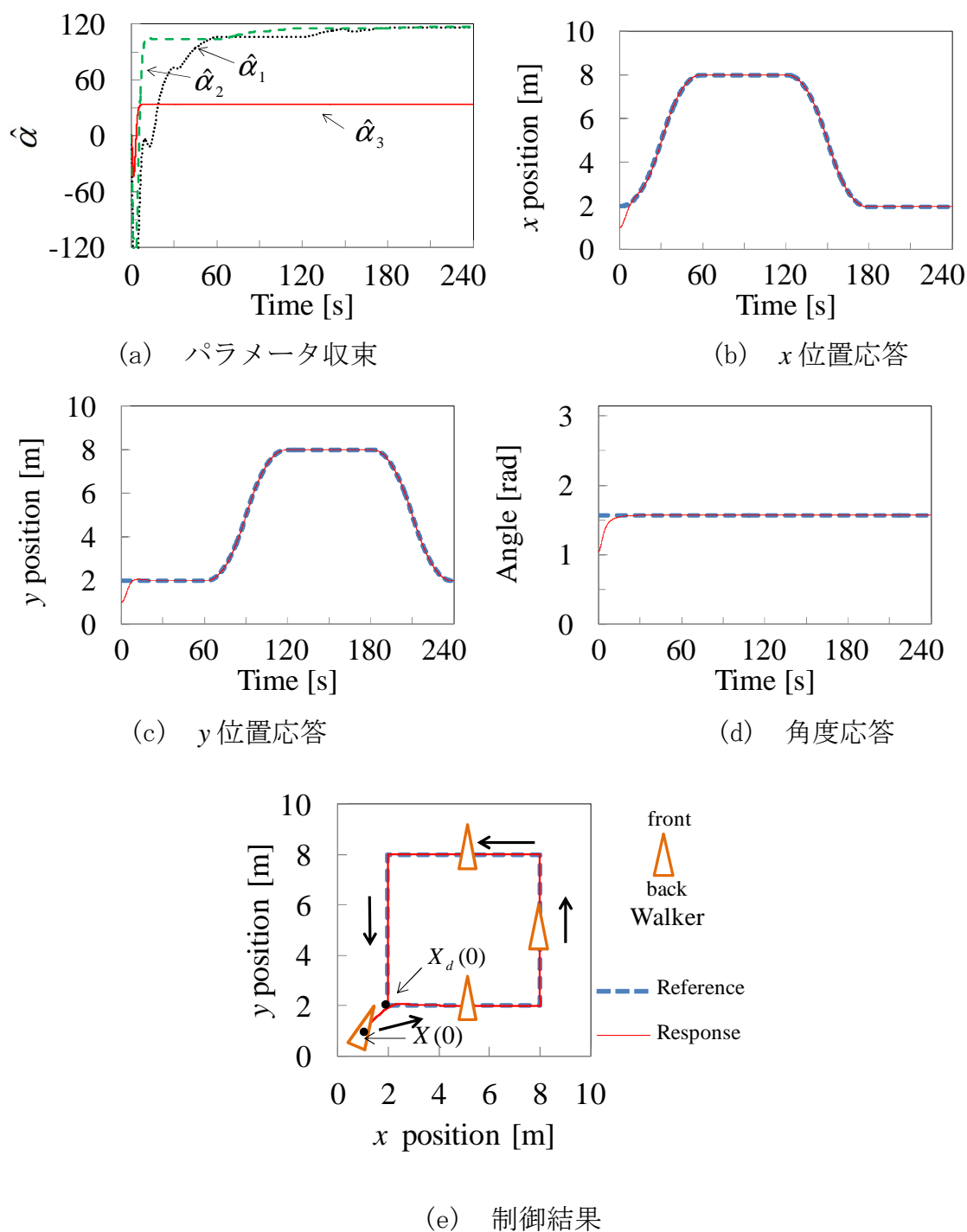


図 3.5 制御結果-荷重あり

### 【制御法1と制御法2との比較】

第2章では、歩行訓練機の中心と重心が同じ位置にある場合、モデル1を導出し、制御法1を開発した。本章では、実際の歩行訓練機によく似ているモ

デル2（即ち，歩行訓練機の中心と重心が異なるモデル）に対して制御法2を改善する．本節は，歩行訓練機のモデル1と制御法1と，改善したモデル2とその制御法2とを比較する．二つの目標経路を用いて，シミュレーションを行う．

まず，円経路の場合，目標軌道は下記の通りである．

$$[x_{Gd} - x_0]^2 + [y_{Gd} - y_0]^2 = r^2 \quad (3.22)$$

目標軌道は式 (3.23) のように設定する．

$$\begin{aligned} x_{Gd}(t) &= x_0 + r \cdot \cos\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ y_{Gd}(t) &= y_0 + r \cdot \sin\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ \theta_d(t) &= \frac{20\pi \cdot t}{60} + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (3.23)$$

ただし， $a = -5.2 \times 10^{-4}$ ， $b = 3.1 \times 10^{-2}$ ， $0s \leq t \leq 60s$ ．

適応制御のパラメータは，次の通りである．

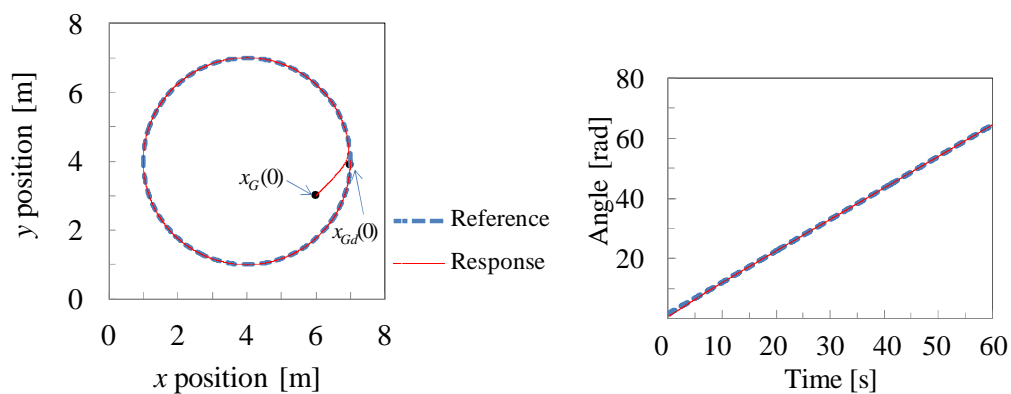
$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0003 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

初期条件は  $x_G(0)=6m$ ， $y_G(0)=3m$ ， $\theta(0)=0^\circ$ ．

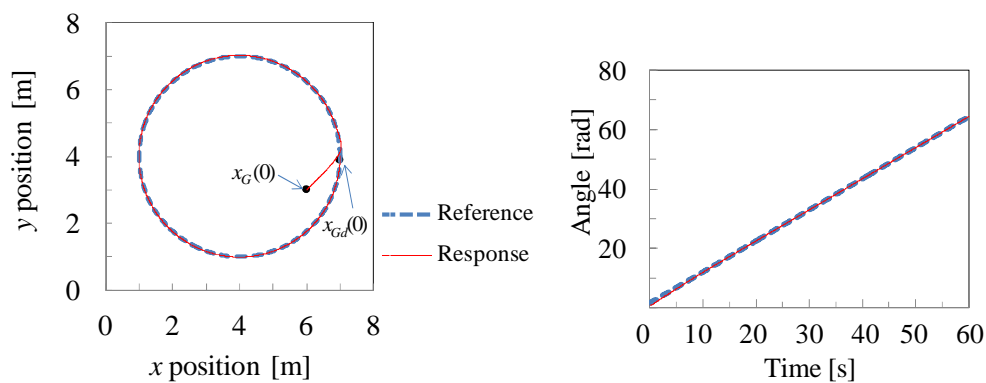
モデル1に対して制御法1を用いて結果は，図3.6に示す．図3.6の左側に経路追従の結果を示す．図3.6の右側に歩行訓練機の姿勢角度の追従結果を表す．荷重なし（図3.6(a)）と荷重あり（図3.6(b)）の時，目標経路に良く追従することが分かる．

モデル1に対して制御法2を用いて結果は，図3.7に示す．図3.7の座標の設定は図3.6とおなじである．図3.7(a)と図3.7(b)比較すると，ほぼ同じ追従結果を得られました．

図3.6と図3.7の結果より，モデル1に対して，制御法1と制御法2両方とも良く制御することがわかる．

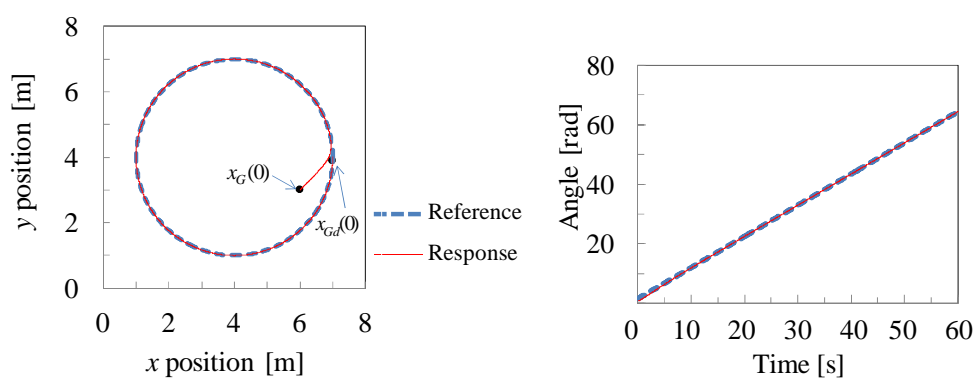


(a) 荷重なし ( $m = 0$  kg,  $r_0 = 0.00$  m)



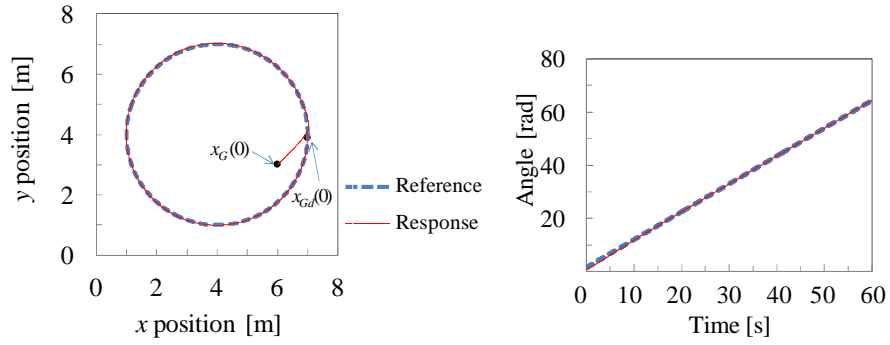
(b) 荷重あり ( $m = 60$  kg,  $r_0 = 0.30$  m)

図 3.6 モデル 1 制御法 1



(a) 荷重なし ( $m = 0$  kg,  $r_0 = 0.00$  m)





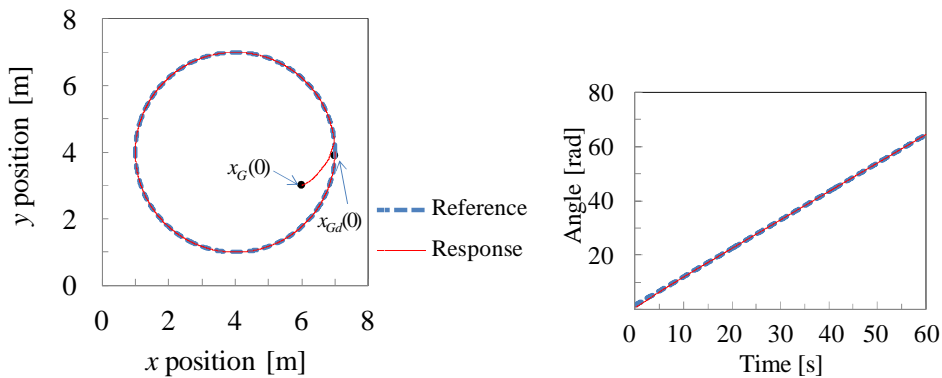
(b) 荷重あり ( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ )

図 3.7 モデル1 制御法2

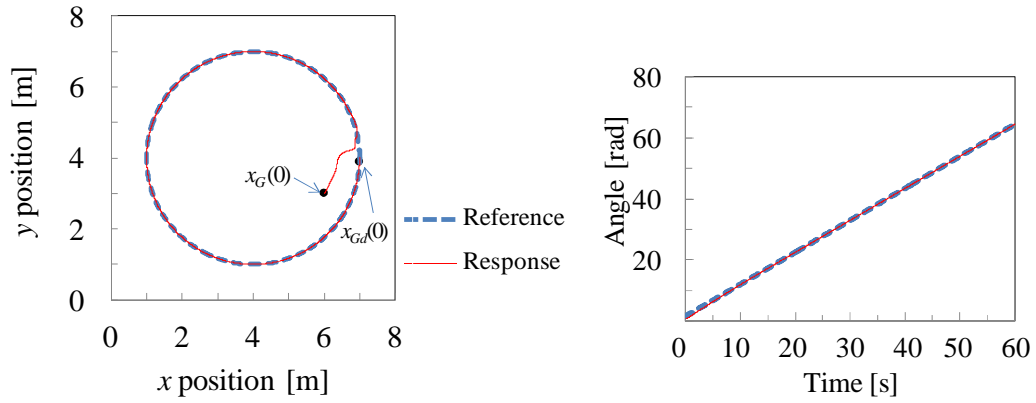
モデル2に対して制御法2を用いた結果は、図3.8に示す。図3.8の座標の設定は図3.6と同じである。図3.8(a)と図3.8(b)の結果より、目標経路に良く追従することが分かる。

モデル2に対して制御法1を用いた結果は、図3.9に示す。図3.9の座標の設定は図3.6と同じである。図3.9(a)の結果を見ると、荷重なしの時、歩行訓練機は目標経路に追従できない。図3.9(b)より、荷重ありの場合、経路追従誤差が大きくなることが分かる。

原因としては、モデル1はモデル2の特例であり、重心と中心が同じ位置にある場合、モデル2の動力学式(3.9)は、モデル1の動力学式(2.5)になる。同じように、重心と中心は同じ位置にある場合、制御法2は制御法1になる。したがって、制御法2はモデル1とモデル2に対して、良く制御することができる。逆に、制御法1は、モデル2に対して適応できない。

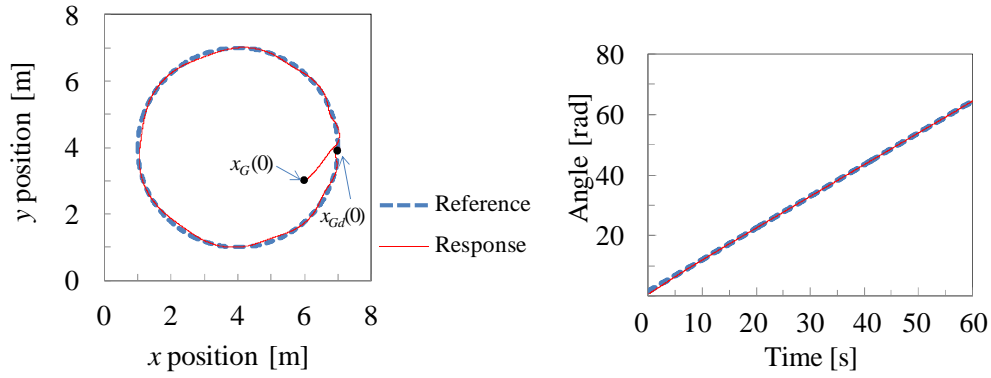


(a) 荷重なし ( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.16 \text{ m}$ ,  $\beta = 90^\circ$ )

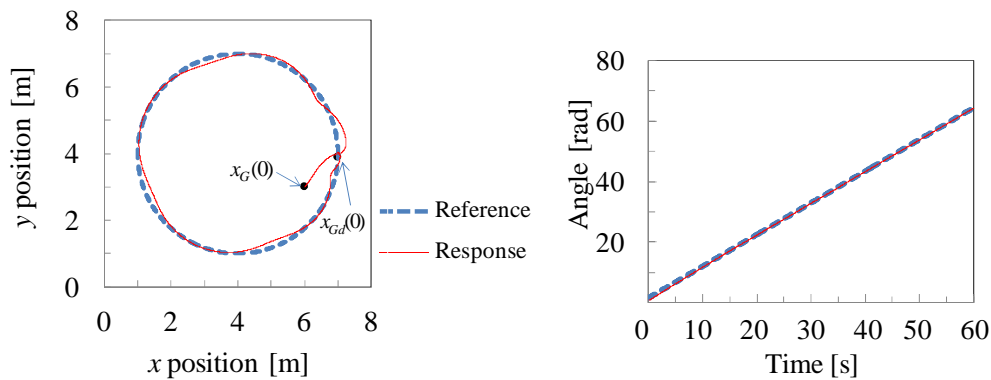


(b) 荷重あり ( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ ,  $\beta = 140^\circ$ )

図 3.8 モデル 2 制御法 2



(a) 荷重なし ( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.16 \text{ m}$ ,  $\beta = 90^\circ$ )



(b) 荷重あり ( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ ,  $\beta = 140^\circ$ )

図 3.9 モデル 2 制御法 1

同様に、目標経路は正方形の場合、同じ結果を得られる。目標軌道は下記の通りである。

$$\begin{cases} x_d(t) = d(t) + 2 \\ y_d(t) = 2 \end{cases} \quad (0s \leq t \leq 60s) \\
 \begin{cases} x_d(t) = 8 \\ y_d(t) = d(t) + 2 \end{cases} \quad (60s \leq t \leq 120s) \\
 \begin{cases} x_d(t) = 8 - d(t) \\ y_d(t) = 8 \end{cases} \quad (120s \leq t \leq 180s) \\
 \begin{cases} x_d(t) = 2 \\ y_d(t) = 8 - d(t) \end{cases} \quad (180s \leq t \leq 240s)
 \end{cases} \quad (3.25)$$

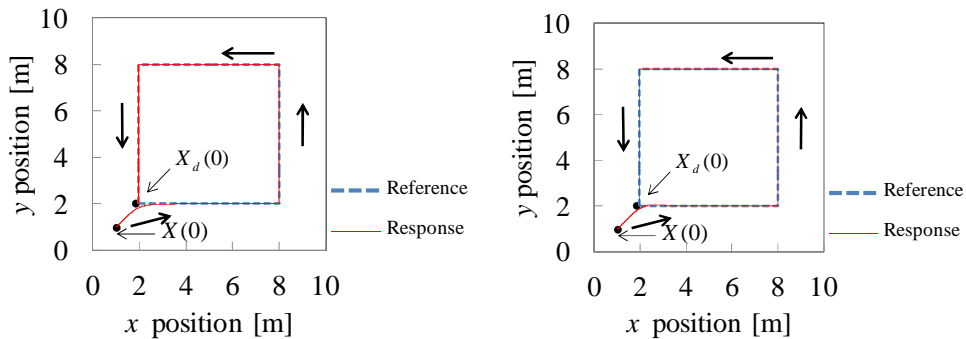
$$\theta_d(t) = \frac{20\pi \cdot t}{60} + \frac{\pi}{2}$$

ただし、 $d(t)$  の定義は式 (3.18) に示す．適応制御のパラメータは次のようになる．

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.00004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00003 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000013 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 40 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

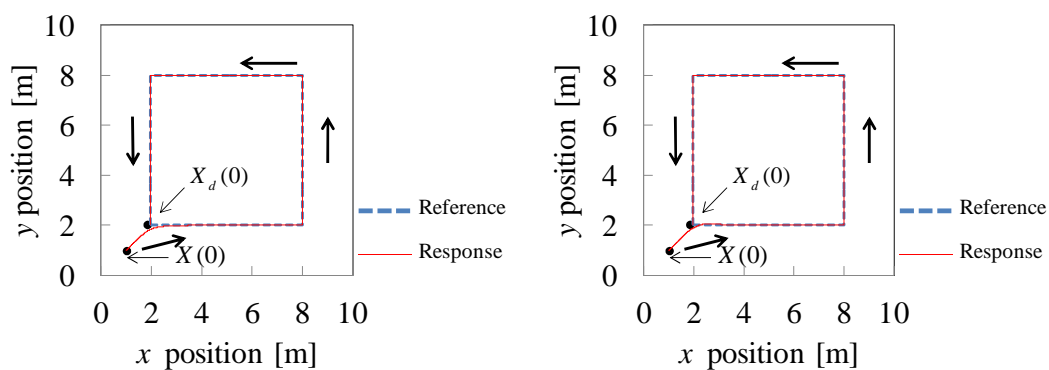
初期条件は  $x_G(0)=1m$ ,  $y_G(0)=1m$ ,  $\theta(0)=0^\circ$  である．

図 3.10 と図 3.11 により，モデル 1 に対して制御法 1 と制御法 2 で制御する時，良く経路を追従した．図 3.12 の結果により，モデル 2 に対して制御法 2 で良く制御する．しかし，図 3.13 に示しているように，モデル 2 に対して制御法 1 は目標経路に追従できない．



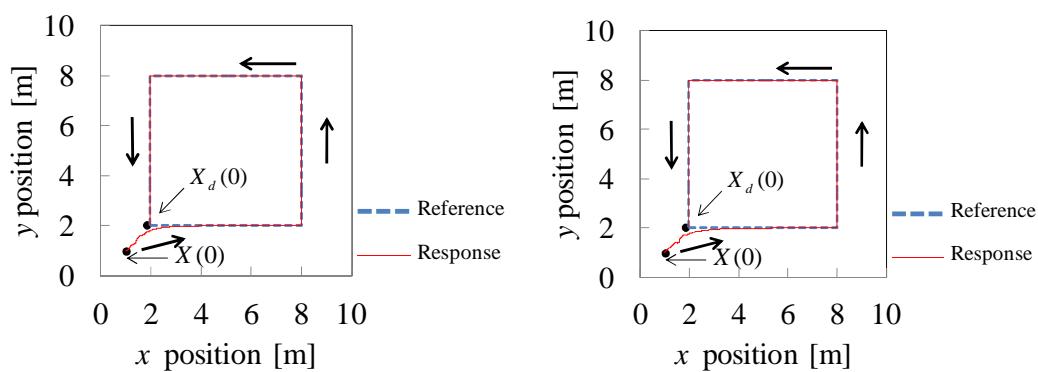
(a) 荷重なし ( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.00 \text{ m}$ ) (b) 荷重あり ( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ )

図 3.10 モデル 1 制御法 1



(a) 荷重なし ( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.00 \text{ m}$ ) (b) 荷重あり ( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ )

図 3.11 モデル 1 制御法 2



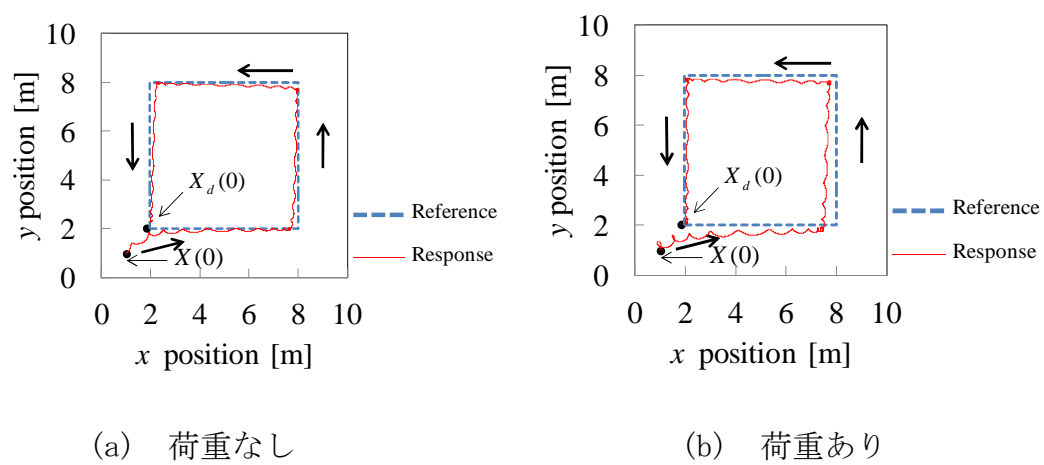
(a) 荷重なし

(b) 荷重あり

( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.16 \text{ m}$ ,  $\beta = 90^\circ$ )

( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ ,  $\beta = 140^\circ$ )

図 3.12 モデル 2 制御法 2



( $m = 0 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.16 \text{ m}$ ,  $\beta = 90^\circ$ )

( $m = 60 \text{ kg}$ ,  $r_0 = 0.30 \text{ m}$ ,  $\beta = 140^\circ$ )

図 3.13 モデル2 制御法1

### 3.5 結言

本章では，第2章の平面モデル1より実際の歩行訓練機に良くあう数学モデルを導出した．そして，導出した数学モデルに基づいて適応制御法の改善を行った．シミュレーションでは，開発した適応制御法で歩行訓練機は荷重なしの場合も荷重ありの場合も目標経路を良く追従できた．シミュレーションにより，有効性を確認した．

重心と中心が同じ位置にあるモデル1は，モデル2の特例である考えられる．重心と中心が同じ位置にある場合，モデル2の動力学式は，モデル1の動力学式になる．同様に，制御法2は制御法1になる．したがって，制御法2はモデル1とモデル2両方に対して，有効である．逆に，制御法1は，モデル2に対して適応できない．シミュレーションにより，二種類の目標経路を用いて制御法2の一般性を証明した．

## 参考文献

1. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Nonlinear Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Dynamic Model Improvement and Experiment, ICIC Express Letters, vol.6, no3, pp.611-615, March 2012.
2. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, Y. Kobayashi and M. G. Fujie: An Improved Adaptive Controller with Parameter Optimization by GA for an Omni-directional Walker, Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2012. (will be published)
3. 譚 仁鵬, 王 碩玉, 姜 銀来, 石田 健司, 藤江 正克: 全方向移動型歩行訓練機の運動制御法の改善, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2011 講演論文集(CD-R), paper\_175, 2011.

## 第4章

### 制御法におけるパラメータの自動調整

#### 4.1 緒言

前節，理学療法士の提示される運動処方を充実に実現するために，患者の重心ずれに対応する非線形適応制御法を開発し，シミュレーションにより，経路追従精度向上に有効性があることを示した．非線形適応制御法のパラメータによって経路追従精度は異なる．マニュアルで調整する場合，時間がかかる上，最適のパラメータを設定するのは困難である．また，目標軌道が変わったら，適応制御のパラメータが再調整する必要がある．したがって，自動的にパラメータを調整する方法が求められる．パラメータの自動調整法としては，ニューラル・ネットワークと遺伝的アルゴリズム (GA) がよくつかわれている．

本章では，先ず，時間概念を含める経路追従誤差を改めて定義し，ニューラル・ネットワーク (NN) と遺伝的アルゴリズム (GA) を基づいて自動的にパラメータ調整法を提案する．最後にシミュレーションにより本手法の有効性を示す．

遺伝的アルゴリズム (GA) に基づいたパラメータの探索法を用いて，シミュレーションで適応制御法の最適なパラメータを探す．そのパラメータの最適値は歩行訓練機実験を実施する参考値として利用する．実験では，改善した制御法の有効性を検証するため，PID 制御と比較実験を行う．



## 4.2 ニューラル・ネットワークによる調整

NN は、図 4.1 に示すように、人間の脳内のニューロンの結合からなる神経回路網を模擬した学習手法である。樹状突起、軸索、及び細胞体を多数結合したのが NN である。

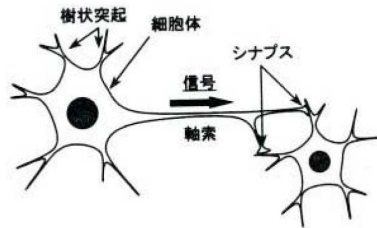


図 4.1 ニューロン

こうした生物系内のニューロンを次式でモデル化した[1].

$$x_i(t+1) = 1[\sum_j w_{ij}x_j(t) - \theta_i] \quad (4.1)$$

ただし、 $x_i$  はニューロン  $j$  からの信号を、 $w_{ij}$  はニューロン  $j$  からニューロン  $i$  へのシナプス結合度、 $\theta_i$  はニューロン  $i$  の発火しきい値、 $1[x]$  は  $x > 0$  の時 1,  $x < 0$  の時 0 となる単位ステップ関数である。

式 (4.1) では、 $1[x]$  の微分は、 $x = 0$  で無限大となってしまうため、NN を模擬した計算機構を用いるのは不可能である。NN における計算機構では、McCulloch-Pitts が提唱した式 (4.1) は使わず、次式を使う。

$$x_i(t+1) = f(\sum_j w_{ij}x_j(t)) \quad (4.2)$$

NN は式 (4.2) 式でモデル化されるニューロンを多数、回路網上に組み合わせたものである。出力は、入力層のニューロンに値を代入し、それらの出力を 2 階層以降のニューロンに次々に入力し、出力層のニューロンの出力を求める、ことによって計算される。

### 4.2.1 ニューラル・ネットワーク

NN の学習アルゴリズムとしては、一般に、誤差逆伝搬学習法（BP : Back Propagation）[2, 3]が用いられる．本節は BP を基づいて適応制御のパラメータ（ $\lambda$ ， $K$ ， $\Gamma$ ）の自動調整法を提案する[4, 5]．パラメータ調整を含めた制御系を図 4.2 に示す．

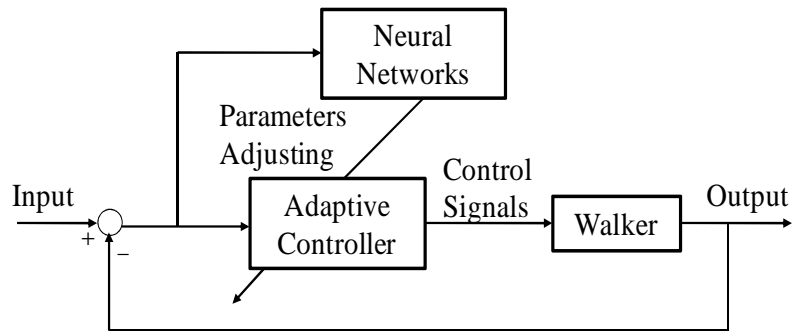


図 4.2 制御系

理論的には、中間層が 1 層のみのネットワークで十分である．NN の 3 層構造を、図 4.3 に示す．（ $i=3$ ， $j=9$ ， $l=9$ ．）

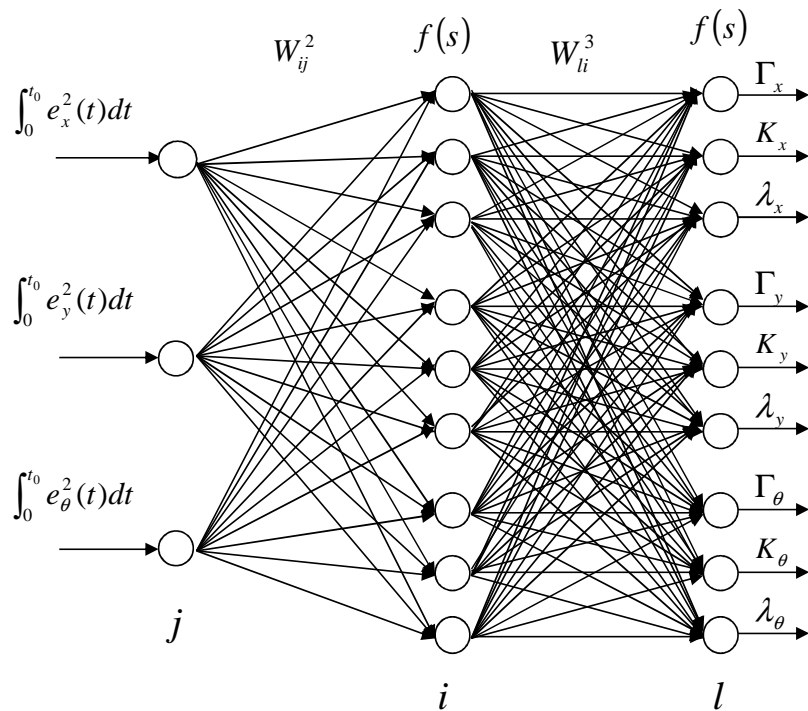


図 4.3 NNの構造

入力層：

$$O_1^1 = \int_0^{t_0} e_x^2(t) dt \quad (4.3)$$

$$O_2^1 = \int_0^{t_0} e_y^2(t) dt \quad (4.4)$$

$$O_3^1 = \int_0^{t_0} e_\theta^2(t) dt \quad (4.5)$$

中間層：

$$net_i^2 = \sum_{j=1}^3 (W_{ij}^2 O_j^1) \quad (4.6)$$

$$O_i^2 = f[net_i^2] \quad (4.7)$$

出力層：

$$net_l^3 = \sum_{i=1}^{12} (W_{li}^3 O_i^2) \quad (4.8)$$

$$O_l^3 = net_l^3 \quad (4.9)$$

ただし、 $f(s) = \frac{1}{1+e^{-s}}$  は、ニューロン出力関数である。

ここでは以下の評価規範  $J(n)$  を時間概念を含める経路追従誤差として改めて定義する。

$$J(n) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} [a \times e_x^2(t) + b \times e_y^2(t) + c \times e_\theta^2(t)] dt \quad (4.10)$$

ただし、 $a=b=1$ ,  $c=1\text{m}^2/\text{rad}$ .  $n$  はパラメータの調整回数である。

$W_{li}^3$  および  $W_{ij}^2$  の更新規則は、以下に示す勾配法を用いて導出する。

$$W_{li}^3(n+1) = W_{li}^3(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{li}^3} \quad (4.11)$$

$$W_{ij}^2(n+1) = W_{ij}^2(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{ij}^2} \quad (4.12)$$

ただし,  $\eta$  は, 学習係数である.

$$\frac{\partial J}{\partial W_{li}^3} = \frac{\partial J}{\partial O_l^3} \cdot \frac{\partial O_l^3}{\partial net_l^3} \cdot \frac{\partial net_l^3}{\partial W_{li}^3} = \frac{\partial J}{\partial O_l^3} \cdot O_i^2 \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial J}{\partial W_{ij}^2} = \frac{\partial J}{\partial O_i^2} \cdot \frac{\partial O_i^2}{\partial net_i^2} \cdot \frac{\partial net_i^2}{\partial W_{ij}^2} = \sum_{l=1}^9 \frac{\partial J}{\partial O_l^3} \cdot W_{li}^3 \cdot f'[net_i^2] \cdot O_j^1 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial J}{\partial O_l^3} = \frac{J(n) - J(n-1)}{O_l^3(n) - O_l^3(n-1)} \quad (4.15)$$

#### 4.2.2 パラメータ調整結果

上記のパラメータの調整方法を用いてシミュレーションを行う.

目標経路は円形である. 軌道は式 (4.16) のような時間関数とする.

$$\begin{aligned} x_{Gd}(t) &= x_0 + r \cdot \cos\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ y_{Gd}(t) &= y_0 + r \cdot \sin\left[\frac{1}{r} \cdot \left(\frac{a}{3}t^3 + \frac{b}{2}t^2\right)\right] \\ \theta_d(t) &= \frac{2\pi \cdot t}{150} + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

ただし,  $x_0 = 4m$  ;  $y_0 = 4m$  ;  $r = 3m$  ;  $a = -3.351 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot m/s^3$  ;  $b = 5.027 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot m/s^2$ . シミュレーション時間  $t$  は,  $0 \leq t \leq 150s$ . 初期条件としては,  $x_G(0) = 7.00m$ ,  $y_G(0) = 4.00m$ ,  $\theta(0) = 90^\circ$  である.

学習係数  $\eta = 0.00005$ . 表 4.1 に学習回数につれて適応パラメータと評価誤差との関係を表す. NN による学習で最初の適応制御パラメータはマニュアル式で選んだ. NN の初期重み係数の値  $W_{li}^3$  および  $W_{ij}^2$  はランダムで発生した.  $n=2$  から NN による学習で得られた制御パラメータで制御した学習効果を見るために,  $n=2$  から学習回数につれて評価関数の値の変化様子を図 4.4 に示す. 2000 回の学習で評価誤差  $J(n)$  は,  $0.560m$  から  $0.007m$  に下がり, 精度良く追従したこと

が分かる．

表 4.1 学習回数につれて適応パラメータと評価誤差

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\Gamma_1$	$\Gamma_2$	$\Gamma_3$	$J$
$n=0$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.100	1.000	1.000	0.100	0.560
$n=1$	1.355	1.267	1.168	1.961	1.594	1.579	1.808	1.509	1.500	0.060
$n=2$	1.136	1.080	0.987	1.595	1.300	1.313	1.492	1.222	1.188	0.145
$n=2000$	2.028	2.433	4.390	2.873	2.436	2.383	2.225	2.022	1.366	0.007

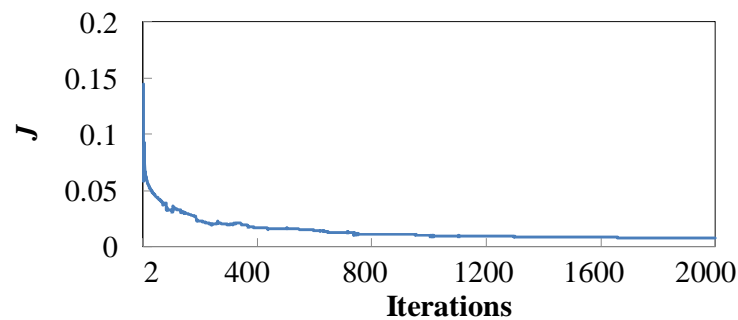
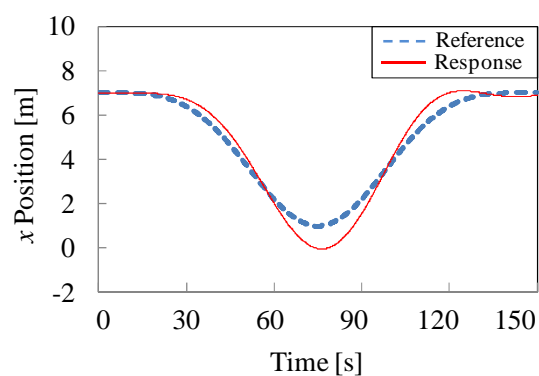


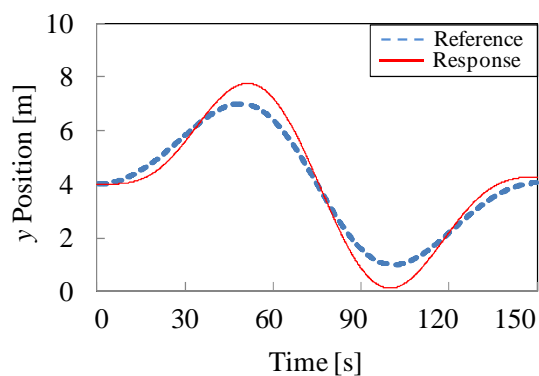
図 4.4 評価誤差の変化

$n=0$  時適応制御のシミュレーション結果を，図 4.5 に示す．図 4.5 (a)，図 4.5 (b) と図 4.5 (c) では，横軸は時間，縦軸は  $n=0$  の時歩行訓練機の  $x$  位置， $y$  位置と角度応答を表す．制御結果を示す図 4.5 (d) では，横軸は  $x$  横軸の位置応答，縦軸は  $y$  縦軸の位置応答を表す．点線は目標軌道であり，直線は適応制御で歩行訓練機の応答である．図 4.5 に示すように，歩行訓練機は目標軌道から離れた．マニュアルで選択した適応制御パラメータで，良い追従結果を得られないことができない．

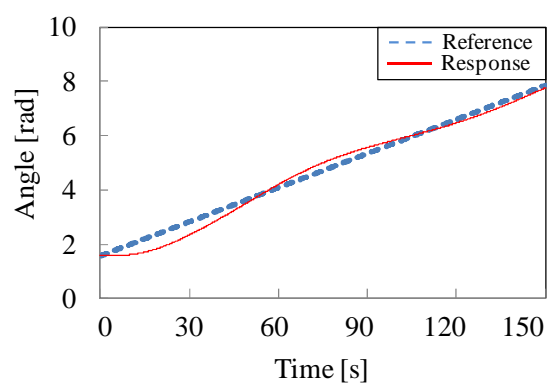
図 4.6 では，NN による 2000 回でパラメータ自動調整した適応制御結果を示す．図 4.6 の座標の設定は図 4.5 と同様である．図 4.6 に， $x$  方向の距離， $y$  方向の距離と姿勢角度には，良い訓練結果を見られた．作業空間においても，最初の追従誤差図 4.5 (d) より，2000 回の学習で制御した誤差が低減されたことが分かる．これらの結果により，提案したパラメータの自動調整法の有効性が確認された．



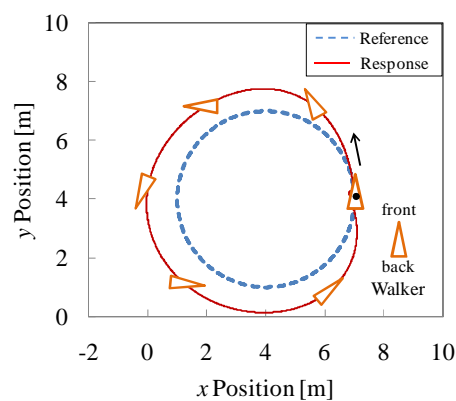
(a)  $x$  位置応答



(b)  $y$  位置応答

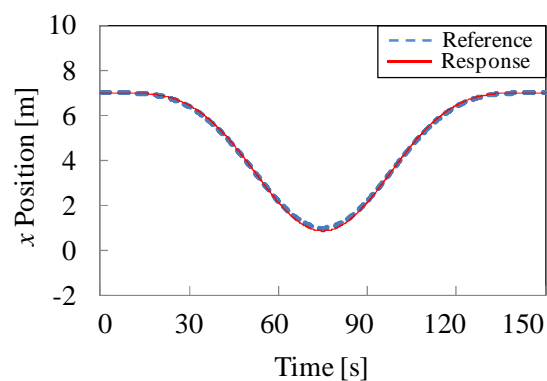


(c) 角度応答

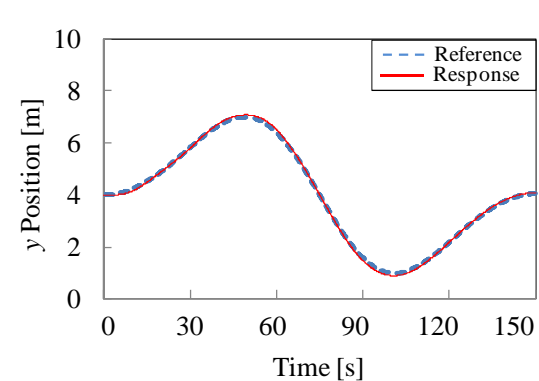


(d) 制御結果

図 4.5 適応制御結果 ( $n=0$ )



(a)  $x$  位置応答



(b)  $y$  位置応答

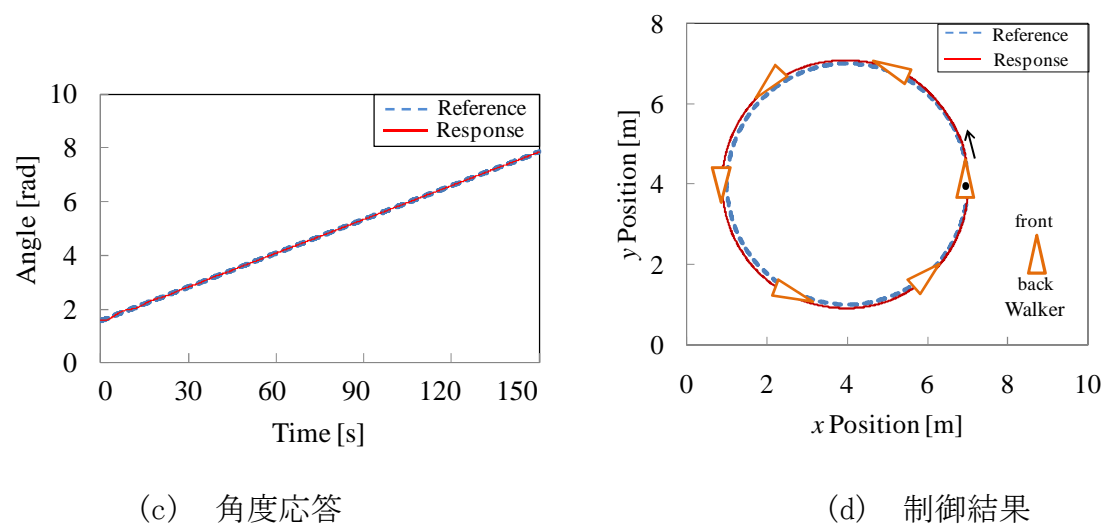


図 4.6 適応制御結果 ( $n=2000$ )

### 4.3 遺伝的アルゴリズムによる調整

非線形適応制御則のパラメータを手動で設定していたため、最適なパラメータを求めるのに時間がかかるという問題点があった。前節は、BP が用いられてきた。しかし、BP には局所的最適解に陥りやすいという問題が指摘されるため本節では、時間概念のある追従速度も考慮した経路追従誤差を定義し、GA を用いてパラメータの探索法を開発し、シミュレーションで適応制御法の最適なパラメータを探す。シミュレーションにより本手法の有効性を実証する。

#### 4.3.1 遺伝的アルゴリズム

GA は、生物進化（選択淘汰・突然変異）の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索・学習・最適化の一手法と考える事ができる[6]。本節は、適応制御則における制御パラメータの最適化に GA 手法を用いる[7, 8]。

個体遺伝子の表現型を適応制御のパラメータ( $\lambda$ ,  $K$ ,  $\Gamma$ )に対応する、その遺伝子型を数値が格納される変数を一列に並べたものとした。初期集団の各遺伝子の値はランダムで生成した。それぞれの個体には環境に対する適合度関数  $F(n)$  は式(4.17)のように設定した。

$$F(n) = \frac{1}{E(n)+1} \quad (4.17)$$

ただし、目的関数  $E(n)$  は、経路追従誤差のほか時間概念のある速度の追従誤差も考慮した追従誤差と定義する。

$$E(n) = \int_0^{10} [a \times e'(t) + b \times \dot{e}'(t)] dt \quad (4.18)$$

ただし、

$$\begin{aligned} e'(t) &= e_x^2(t) + e_y^2(t) + e_\theta^2(t), \\ \dot{e}'(t) &= \dot{e}_x^2(t) + \dot{e}_y^2(t) + \dot{e}_\theta^2(t), \end{aligned}$$

$a=10$ ,  $b=1 \text{ s}^{-2}$ .  $n$  は個体数である。目的関数  $E(n)$  適合度の高い個体ほど、目的関数の評価値は最適値に近くなる。



そして、生成された母集団に対し、選択、交叉、突然変異といった遺伝的操作を繰り返し適用する。選択には、適応度に基づいたルーレット選択方法を利用し、交叉には一様位置交叉であり、突然変異には摂動突然変異方法である。こうして世代の更新が繰り返されることによって、よりよい個体（最適解に近い個体）が増えていき、やがて、最適解に到達する。終了条件は、世代交代の数があらかじめ設定された回数を超えた場合を終了とした。GA の基本動作は、図 4.7 のようになる。

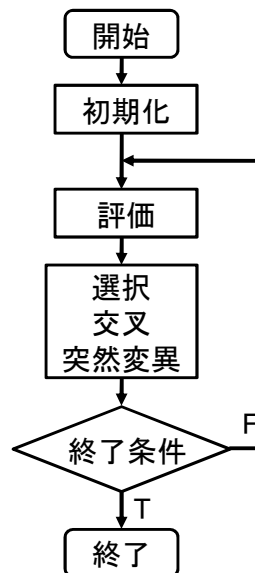


図 4.7 遺伝的アルゴリズムの流れ図

#### 4.3.2 パラメータ調整結果

まず、目標経路について説明する。要訓練者の病状により、理学療法士が歩行訓練経路を設定する。本節では、設定された訓練経路に良く使われている歩行直線経路を目標経路として、シミュレーションを行う。目標経路は、式 (4.19) に示すような斜め  $45^\circ$  移動の直線である。

$$x_{Cd} = y_{Cd} \quad (4.19)$$

目標軌道は、式 (4.20) に示す。

$$\begin{aligned}
 x_{cd}(t) &= \frac{a_1}{3}t^3 + \frac{b_1}{2}t^2 \\
 y_{cd}(t) &= \frac{a_1}{3}t^3 + \frac{b_1}{2}t^2 \\
 \theta_d(t) &= \frac{a_2}{3}t^3 + \frac{b_2}{2}t^2 + \frac{\pi}{4}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

ただし,  $a_1 = -1.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}^3$ ,  $b_1 = 1.2 \times 10^{-1} \text{ m/s}^2$ ,  $a_2 = -4.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^3$ ,  $b_2 = 4.7 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$ .  $0 \leq t \leq 10 \text{ s}$ .

初期条件としては,  $x_G(0)=0.0\text{m}$ ,  $y_G(0)=0.0\text{m}$ ,  $\theta(0)=45^\circ$  である. GA の初期パラメータの設定について述べる. 荷重なしの時, GA で適応制御のパラメータが自動調整する. ランダムで生成した母集団の範囲は 0.1 から 100.1 までである. GA の初期パラメータは表 4.2 に示す.

表 4.2 GA に設定されたパラメータ値

パラメータ	値
世代数	200
母集団サイズ	100
交叉率	0.80
突然変異率	0.01

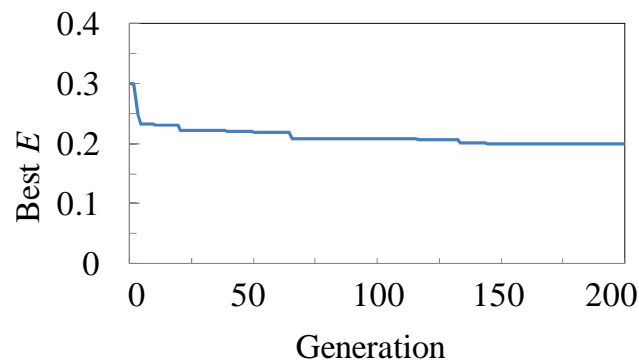
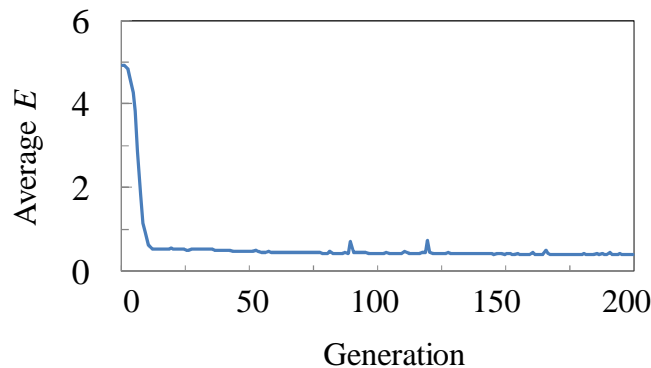


図 4.8 各世代までの最適な個体の追従誤差  $E$  の変化

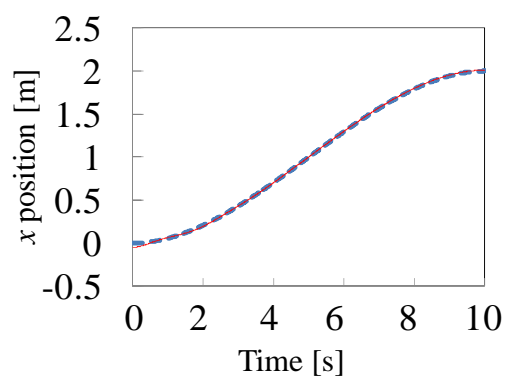
図 4.9 各世代までの平均の追従誤差  $E$  の変化

GA を用いてシミュレーションを行った各世代までの最適個体の追従誤差  $E$  の変化を図 4.8 に示す. グラフの横軸は世代数, 縦軸は最適個体の目的関数  $E$  を示したものである. 200 世代で経路追従誤差は  $0.30\text{m}^2$  から  $0.19\text{m}^2$  に軽減されることが分かった. 200 世代以後では, 経路追従誤差は緩やかに零に近づきる. GA では, 初期設定に関わらず, 経路追従誤差は零に収束できる. 各世代の平均の追従誤差  $E$  の変化は図 4.9 に示す. GA で得られた 200 世代の非線形適応制御におけるパラメータの最適値は表 4.3 に表す.

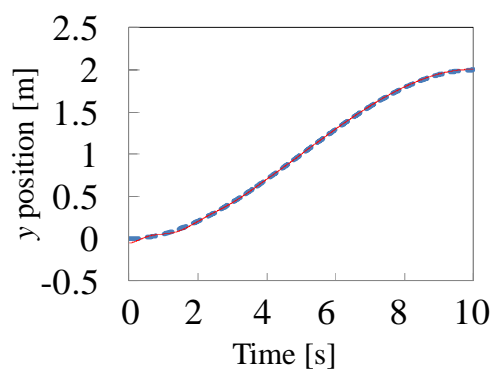
表 4.3 GA で調整したパラメータ値

$\lambda_1$	$K_1$	$\Gamma_1$	$\lambda_2$	$K_2$	$\Gamma_2$	$\lambda_3$	$K_3$	$\Gamma_3$
6.9	93.5	84.4	8.1	99.7	90.4	2.9	97.2	75.5

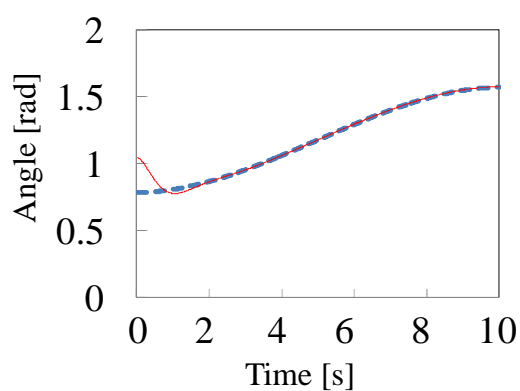
表 4.3 のパラメータ値を用いて, 経路追従を行った結果を図 4.10 に示す. 横軸は  $x$  横軸の位置応答, 縦軸は  $y$  縦軸の位置応答, 三角形は歩行訓練機の向きを示す. 点線は目標経路で, 実線はシミュレーション結果である. 位置追従と歩行訓練機の方角も, よく追従できることが分かる. その時, 誤差  $E(200)=0.19\text{m}^2$  である. これらの結果により, 提案したパラメータの自動調整法の有効性が確認された. 調整したパラメータの最適値は, 歩行訓練機による実験の参考値として利用することを次節に述べる.



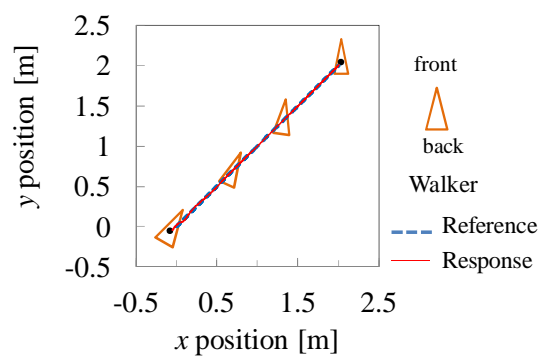
(a)  $x$  位置応答



(b)  $y$  位置応答



(c) 角度応答



(d) 制御結果

図 4.10 適応制御結果 (200 世代)

#### 4.4 実験による検証

実験では、第3章に提出した非線形適応制御法を用いて、歩行訓練機が目標経路を追従し、無荷重と荷重をかけた場合の経路追従の誤差を比較する。提案した適応制御法の有用性を十分に検証するため、PID 制御法による制御結果との比較を行う[9]。

##### 【実験設定】

歩行訓練機の位置と姿勢角度情報の測定方法について説明する。PC カメラを用いて位置と姿勢角度情報を測定する。PC カメラにはロジクール社製の Logitech HD Pro Webcam C910 を使用した。歩行訓練機の座標を求めるためのプログラムは Microsoft Visual C++ 6.0 及び OpenCV Ver. 1.1 を用いて作成した。

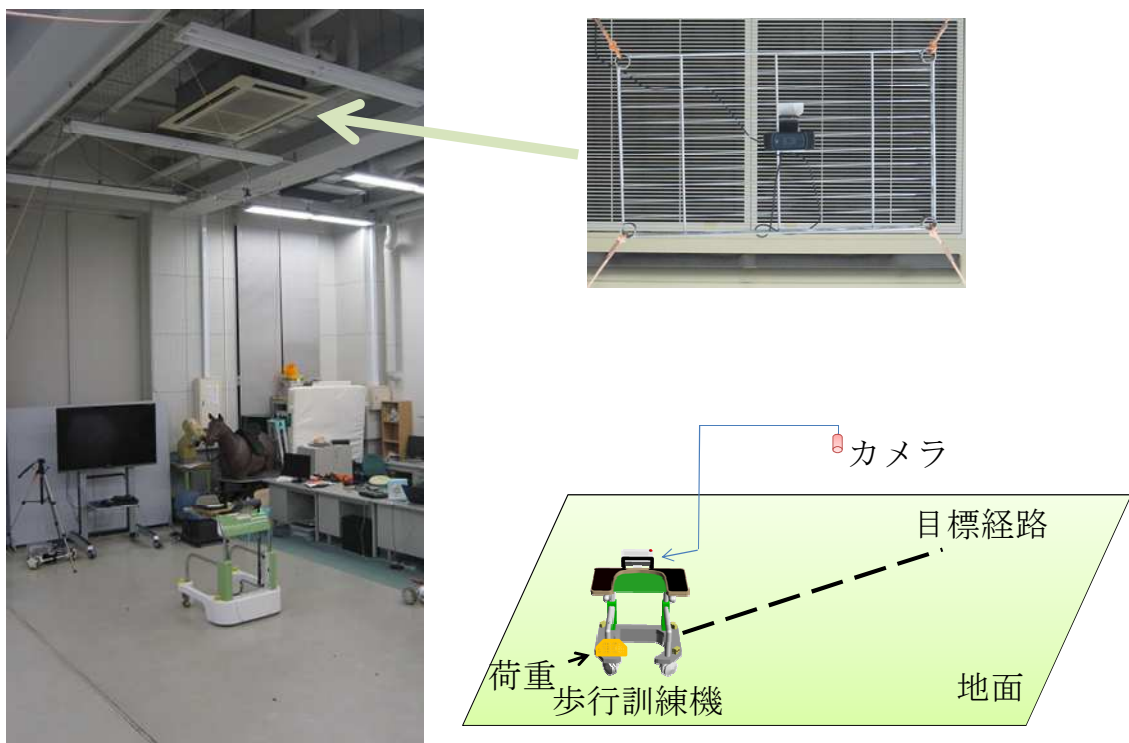


図 4.11 実験環境

実験環境は図 4.11 に示す。歩行訓練機と PC をシリアルケーブルで接続し、

制御情報は PC へ常時送信する．

実験では，歩行訓練する時によく利用されている直線経路を目標経路とする．歩行訓練機は右斜め  $45^\circ$  の目標経路に追従し，目標経路の長さは 2m であり，目標軌道は式 (4.21) に表す．荷重変化の時の実験効果がはっきり見えるため，人の代わりに 8.0kg の荷物を使って，荷重の大きさと掛け方は一回の実験において一定に保って，走行実験を行った．

$$\begin{cases} x_{Gd}(t) = \frac{a_1}{3}t^3 + \frac{b_1}{2}t^2 \\ y_{Gd}(t) = \frac{a_1}{3}t^3 + \frac{b_1}{2}t^2 \\ \theta_d(t) = \frac{a_2}{3}t^3 + \frac{b_2}{2}t^2 + \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (0s \leq t \leq 10s) \quad (4.21)$$

$$\begin{cases} x_{Gd}(t) = 2 \\ y_{Gd}(t) = 2 \\ \theta_d(t) = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10s < t \leq 12s)$$

ここで， $a_1 = -1.2 \times 10^{-2} \text{ m/s}^3$ ， $b_1 = 1.2 \times 10^{-1} \text{ m/s}^2$ ， $a_2 = -4.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^3$ ， $b_2 = 4.7 \times 10^{-2} \text{ rad/s}^2$ ．初期条件は  $x_G(0)=0\text{m}$ ， $y_G(0)=0\text{m}$ ， $\theta(0)=45^\circ$ ．開始と終止速度を零にする．

### 【適応制御結果】

第3章に提案した適応制御アルゴリズムを用いて実験を行った．実験結果を，図 4.12-図 4.15 に示す．荷重なしの場合，適応制御パラメータは，前節の GA により調整されたパラメータを参考にして調整した．結果は下記のとおりである．

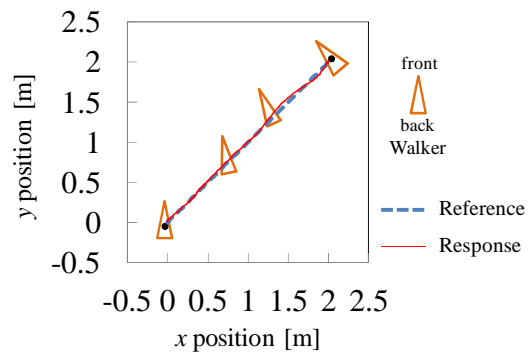
$$\Gamma = \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 80 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 14 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 97 \end{bmatrix}.$$

図 4.12 は、荷重  $m=0\text{kg}$ 、重心ずれ  $r_0=0.16\text{m}$ 、重心ずれ角度  $\theta=90^\circ$  の場合の実験結果である。図 4.12 (b) に歩行訓練機の軌跡と本体の向きを示す。横軸は  $x$  横軸の位置応答、縦軸は  $y$  縦軸の位置応答、点線は目標軌道、実線は歩行機の位置応答を表す。点線と実線はほとんど同じ経路であることが分かる。

適応制御のパラメータを変化させずに、前に  $8.0\text{kg}$  の荷物を置いた場合、荷物の位置は図 4.13 (a) に示し、実験結果は図 4.13 (b) に示す。その時、荷重  $m=8.0\text{kg}$ 、重心ずれ  $r_0=0.18\text{m}$ 、重心ずれ角度  $\beta=90^\circ$  である。歩行訓練機は目標経路を追従することができる。



(a) 荷重なしの歩行訓練機

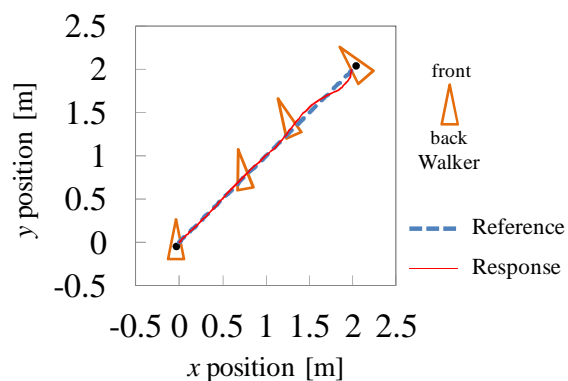


(b) 実験結果

図 4.12 適応制御結果-荷重なし



(a) 前に荷重を置いた歩行訓練機

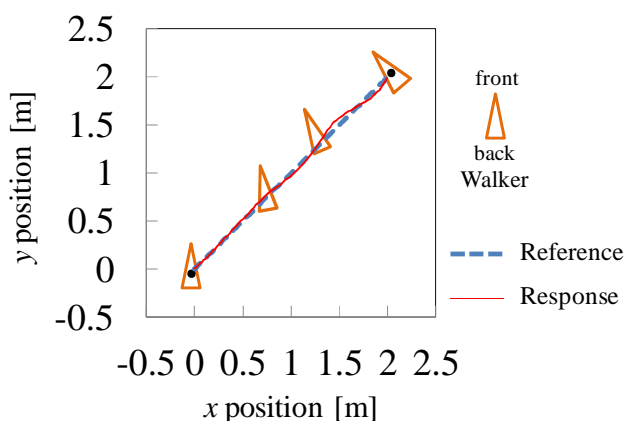


(b) 実験結果

図 4.13 適応制御結果-前に荷重あり



(a) 左に荷重を置いた歩行訓練機

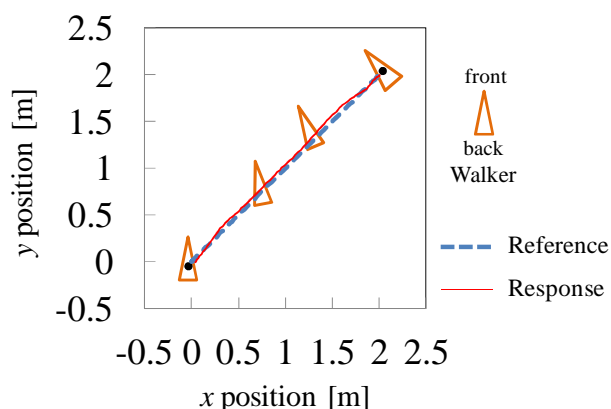


(b) 実験結果

図 4.14 実験環境-左に荷重あり



(a) 右に荷重を置いた歩行訓練機



(b) 実験結果

図 4.15 適応制御結果-右に荷重あり

荷物を左にと右に置く場合，実験結果が図 4.14 と図 4.15 に表す．経路を追従することが分かる．

追従効果を評価するために，荷重なしと荷重が異なる位置に置く場合の最大誤差を表 4.5 に示す．同じ制御パラメータにより，荷重なしの歩行訓練機を制御した場合，経路追従誤差の最大値は 0.05m であった．荷重ありの歩行訓練機を制御した場合，経路追従誤差の最大値は 0.09m であった．姿勢角度の追従誤差は 0.05rad 増えた．

荷重の有無にも関わらず，経路追従の結果はほぼ同じであった．本制御法は荷重変化と重心ずれに適応できることが分かる．これらの結果により，提案した適応制御法の有効性が確認された．



表 4.5 経路追従誤差

	$x$ 方向[m]	$y$ 方向[m]	$\theta$ [rad]
荷重なし	0.04	0.05	0.05
前に荷重掛ける	0.06	0.08	0.07
左に荷重掛ける	0.08	0.06	0.07
右に荷重掛ける	0.04	0.07	0.06

### 【PID 制御結果】

適応制御法と比較するため、PID 制御法を用いて、歩行訓練機の運動制御実験を行った。PID のパラメータを繰り返して調整して得られた最もいい結果を図 4.16 と図 4.17 に示す。制御パラメータは次の通りである。 $Kp_1 = 400$ ,  $Kp_2 = 400$ ,  $Kp_3 = 400$ ,  $Ki_1 = 0.1$ ,  $Ki_2 = 1.0$ ,  $Ki_3 = 1.0$ ,  $Kd_1 = 1200$ ,  $Kd_2 = 1000$ ,  $Kd_3 = 400$ 。

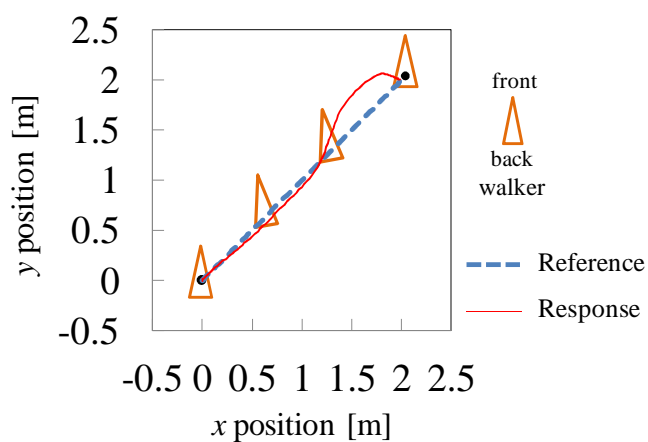
図 4.16 (a) は荷重なしの歩行訓練機であり、図 4.16 (b) は実験結果である。図 4.16 (b) では、横軸は  $x$  横軸の位置応答、縦軸は  $y$  縦軸の位置応答を表し、点線は目標経路で、実線は荷重  $m=0.0\text{kg}$ 、重心ずれ  $r_0=0.16\text{m}$  の場合の実験結果である。三角形は歩行訓練機の姿態を表す。実験結果より、PID 制御法では歩行訓練機が目標経路に追従できないことが分かる。

図 4.17 は  $8.0\text{kg}$  の荷重を歩行訓練機の左に掛けた時の実験である。座標の設定は図 4.16 と同じである。歩行訓練機は目標経路を追従することができなかった。図 4.16 の結果より経路追従誤差が増えたことが分かる。図 4.17 (b) では、 $x$  方向に最大誤差が  $0.54\text{m}$ 、 $y$  方向に最大誤差が  $0.45\text{m}$ 、姿態角度の最大誤差は  $45^\circ$  以上である。歩行訓練機は非線形システムなので、従来の PID 制御法は対応できない。また、PID 制御法は、荷重変化に対応できない。

この誤差により、実際歩行訓練の時、歩行訓練機が理学療法師の設定された経路から大幅離れてしまう可能性がある。したがって、PID 制御は歩行訓練機の運動制御法として利用できないことが分かる。



(a) 荷重なしの歩行訓練機

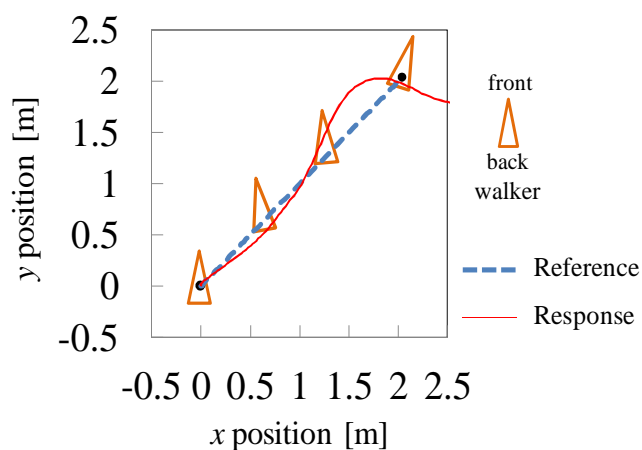


(b) 実験結果

図 4.16 PID 制御結果-荷重なし



(a) 左に荷重を置いた歩行訓練機



(b) 実験結果

図 4.17 PID 制御結果-荷重あり

### 【人による実験】

提出した適応制御法の有効性を検証するため、人が歩行訓練機を使う走行実験を行った。実験では、健常者二人で、式 (4.21) に示す目標経路に追従した。実験結果は図 4.18, 図 4.19 と図 4.20 に示す。

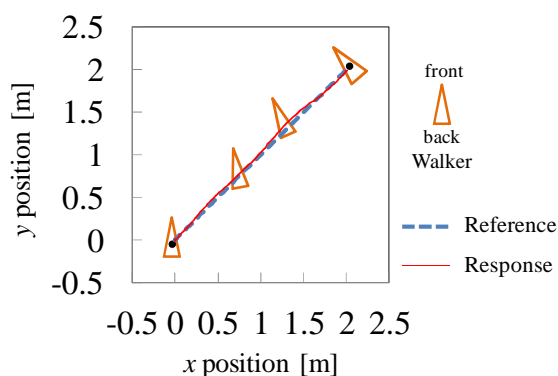
図 4.18 は利用者がいない場合、即ち歩行訓練機単体で目標経路に追従した。実験環境は図 4.18 (a) に表し、追従結果は図 4.18 (b) に示す。歩行訓練機

は目標経路によく追従したことが分かる。

図 4.19 と図 4.20 では、利用者が歩行訓練機を使う実験である。座標の設定は図 4.18 と同じである。図 4.19 と図 4.20 の結果より、利用者 1 と利用者 2 とも訓練経路に良く追従した。したがって、提案した適応制御法歩行訓練機の運動制御法として経路追従精度を向上させる効果が確認された。



(a) 実験環境

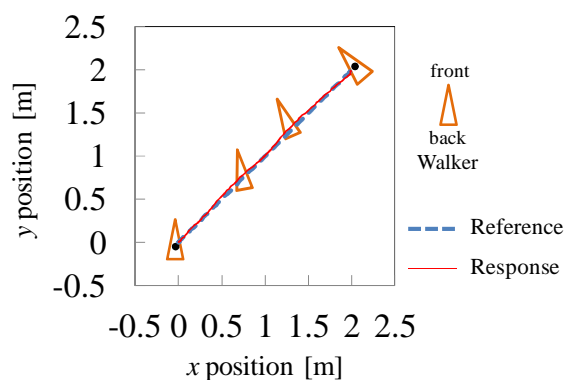


(b) 実験結果

図 4.18 適応制御結果-利用者なし



(a) 実験環境



(b) 実験結果

図 4.19 適応制御結果-利用者 1

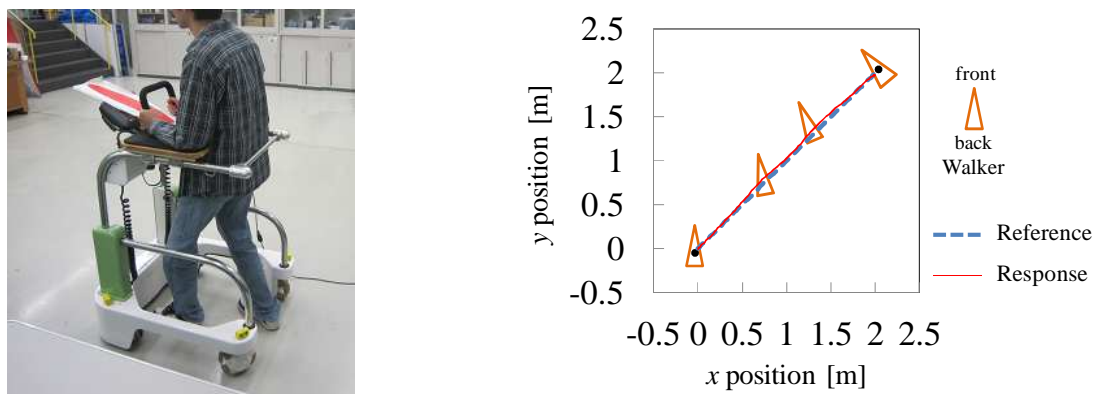


図 4.20 適応制御結果-利用者 2

#### 4.4 結言

非線形適応制御則におけるパラメータを自動調整するため、本章では、時間概念を含める経路追従誤差を定義し、NN を基づいてパラメータの自動調整法を提案した。シミュレーションにより経路追従精度の向上が確認されたが、BP には局所的最適解に陥るという問題がある。そこで、GA に基づく制御パラメータの自動調整法を提案し、シミュレーションにより手法の有効性を示した。

また、GA による制御パラメータの調整を行うことで、最適値に収束することができ、経路精度の改善がみられた。その最適値を用いて、実機実験を実施する時参考値として利用した。走行実験を行った。実験結果より、荷重の有無にも関わらず、追従結果はほとんど同じであった。本制御法は荷重変化と重心ずれに適応できる制御法であることが分かる。また、利用者が歩行訓練機を利用する実験を行った。実験結果より、利用者が居る場合も、歩行訓練機が訓練経路によく追従し、提案した適応制御法の有効性を検証した。

## 参考文献

1. W. S. McCulloch and W. H. Pitts: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bull. Math. Biophys., Vol.5, pp.115-133, 1943.
2. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams: Learning representations by backpropagating errors, Nature, Vol.323-9, pp.533-536, 1986.
3. D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams: Learning internal representations by error propagation, in Parallel Distributed Processing vol 1, J.L. McClelland, D.E. Rumelhard, and The PDP Research group, MIT Press, 1986.
4. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Adaptive Control Algorithm with Parameter Optimization Using Neural Networks for an Omni-directional Walker, ICIC Express Letters, Part B: Applications, vol.1, no.2, pp.201-208, 2010.
5. 譚 仁鵬, 王 碩玉, 姜 銀来, 石田 健司, 藤江 正克: 全方向移動型歩行訓練機の適応制御パラメータの自動調整. 第 53 回自動制御連合講演会 2010, pp.1272-1273, 2010.
6. 米澤 保雄: 遺伝的アルゴリズム—進化理論の情報科学, 森北出版, 1993.
7. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Motion Control with Parameter Optimization by Genetic Algorithm. ICIC Express Letters, Vol.5, No.8(B), pp. 2779-2784, August 2011.
8. 譚 仁鵬, 王 碩玉, 姜 銀来, 三浦 直樹, 石田 健司, 藤江 正克: 歩行訓練機の制御パラメータの自動調整, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会講演論文集, no.115-1, pp.23-24, 2011.
9. R. P. Tan, S. Y. Wang, Y. L. Jiang, K. Ishida, and M. G. Fujie: Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Improvement of Dynamic Model, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.325-330, 2011.

## 第 5 章

# 空間における三次元モデル

### 5.1 緒言

第 2 章と第 3 章では、荷重変化と重心ずれに対して、全方向移動型歩行訓練機の運動制御法を開発し、実験により有効性を示した。歩行リハビリテーションの時、要訓練者が全方向移動型歩行訓練機に肘を掛け、歩行訓練機への力は、垂直方向の圧力だけではなく、水平方向の推力もある。また、歩行訓練機は空間にあるので、経路追従精度のほか、歩行訓練機の転倒問題を考慮する必要もある。

本章では、さらに経路追従の精度と安全性を向上させるため、まず、推力の影響を考慮し、歩行訓練機の二次元モデルを導出する。次は、推力を考慮した二次元モデルに基づいて、平面上における並進運動と自転運動が表せる三次元モデルを提案する。最後に、三次元空間において、歩行訓練機が転倒する際し、歩行訓練機を倒立振子システムと見なし、倒立振子の数学モデル[1, 2]に基づいて、歩行訓練機の並進運動と自転運動と転倒が表せる三次元モデルを構築する。三次元モデルは、要訓練者の推力と歩行訓練機の転倒を考慮するので、歩行訓練機の高精度制御と、転倒防止の安全性向上に貢献できる。

## 5.2 推力を考慮した平面モデル

歩行訓練機を用いた歩行訓練中，要訓練者からの力は  $o-xy$  平面における水平方向の推力と  $o-xy$  平面と垂直する垂直方向の圧力へ分解される．垂直方向の力（即ち要訓練者が肘のかけ方による荷重変化と重心移動）の影響と運動制御法を第 3 章に述べた．本章では，垂直方向の分量，即ち要訓練者から推力を考慮した歩行訓練機のモデルを導出する．

本節では，まず，第 3 章に導出した数学モデルに基づいて推力を考慮した二次元モデルを導出する．推力を考慮した全方向移動型歩行訓練機の二次元モデルを図 5.1 に示す．

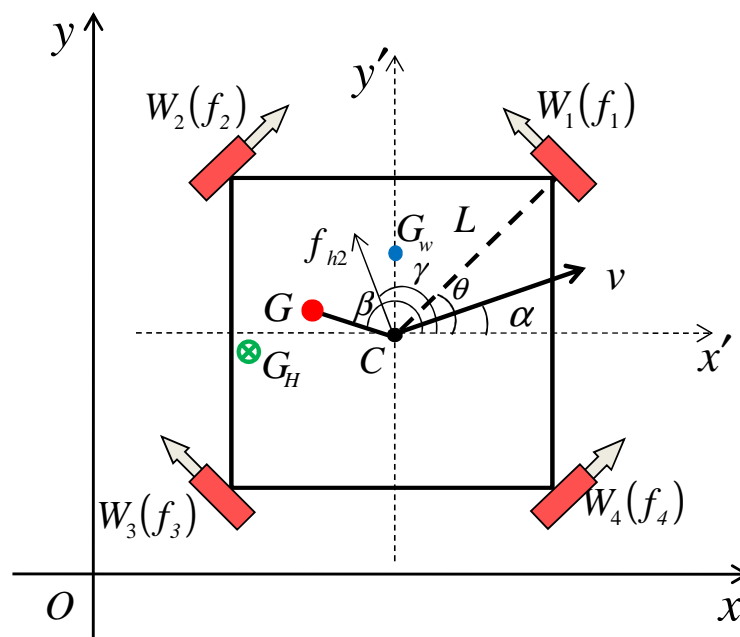


図 5.1 全方向移動型歩行訓練機二次元モデル

$\Sigma_C$  は，静止座標系  $\Sigma_o$  に対する，平行に移動する並進座標系である．要訓練者からの力を，垂直方向の圧力  $f_{h1}$  と水平方向の推力  $f_{h2}$  分解している． $C$  は歩行訓練機の中心であり， $G_w$  は歩行訓練機の重心であり，圧力  $f_{h1}$  を反映する付加負荷重心位置  $G_w$ ． $f_{h1}$  の影響を入り込んだ後システムの重心は  $G$  で表す．推力  $f_{h2}$  の作用線は中心  $C$  を通るものとする．図 5.1 に示した各パラメータの意味と単位は表 5.1 に示す．



表 5.1 歩行訓練機のパラメータ

パラメータ	単位	説明
$f_i$	[N]	オムニホイール $i$ の駆動力 ( $i=1,2,3,4$ )
$v$	[m/s]	歩行訓練機の世界速度
$\alpha$	[rad]	$v$ と $x'$ の成す角度
$L$	[m]	$C$ とオムニホイールの距離
$\theta$	[rad]	$x'$ 軸と $CW_1$ の成す角度
$r_0$	[m]	$C$ と $G_H$ の距離
$I'$	[kg・m <sup>2</sup> ]	システムの慣性モーメント
$M$	[kg]	本体の質量
$f_{h1}$	[N]	要訓練者から歩行訓練機に圧力
$m$	[kg]	要訓練者の等価負荷
$f_{h2}$	[N]	要訓練者から歩行訓練機に推力
$\gamma$	[rad]	$x'$ 軸と $f_{h2}$ の作用線の成す角度
$\beta$	[rad]	$x'$ 軸と CG の成す角度

## 【運動学】

全方向移動型歩行訓練機の世界速度を表す運動学方程式を式 (5.1) に示す.

$$K_c \begin{bmatrix} \dot{x}_c & \dot{y}_c & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{bmatrix}^T \quad (5.1)$$

ただし, 中心位置は  $C(x_c, y_c)$  で表す. マトリックス  $K_c$  は下記の通りである.

$$K_c = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & L \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & -L \\ \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & -L \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & L \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

全方向移動型歩行訓練機の重心の運動を表す運動学方程式を式 (5.3) に示す.

$$K_G \begin{bmatrix} \dot{x}_G & \dot{y}_G & \dot{\theta}' \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{bmatrix}^T \quad (5.3)$$

ただし,  $\theta'$  は,  $x$  軸と  $GW_1$  の成す角度. 重心位置は  $G(x_G, y_G)$  で表す. 行列  $K_G$  は下記のようになる.

$$K_G = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & l_1 \cos(\theta_1 - \theta'_1) \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & -l_2 \cos(\theta_2 - \theta'_2) \\ \sin \theta_3 & -\cos \theta_3 & -l_3 \cos(\theta_3 - \theta'_3) \\ -\sin \theta_4 & \cos \theta_4 & l_4 \cos(\theta_4 - \theta'_4) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

式 (5.1) と式 (5.3) から, 中心と重心との関係は式 (5.5) で求められる.

$$\dot{X}_G = K' \cdot \dot{X} \quad (5.5)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \dot{X}_G &= \begin{bmatrix} \dot{x}_G & \dot{y}_G & \dot{\theta}' \end{bmatrix}^T, \\ \dot{X} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_C & \dot{y}_C & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T, \\ K' &= (K_G^T \cdot K_G)^{-1} \cdot K_G^T \cdot K_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} [\sin \theta \cdot (l'_1 - l'_3) + \cos \theta \cdot (l'_2 - l'_4)] \\ 0 & 1 & \frac{1}{2} [\sin \theta \cdot (l'_2 - l'_4) - \cos \theta \cdot (l'_1 - l'_3)] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

具体的な導出は, 第3章 3.2.1 に参照してほしい.

### 【動力学】

歩行訓練機システムの荷重変化と重心ずれは要訓練者の圧力  $f_{h1}$  に起因し,  $m$  と  $r_o$  に反映される. 推力  $f_{h2}$  の影響で  $o$ - $xy$  平面における移動が起こる. 一方, 推力  $f_{h2}$  はシステム重心を通さないで, 歩行訓練機を回転させる効果もある. そしで, 動力学モデルを次の式のようになる.

$$\begin{cases} (M+m) \ddot{x}_G = -f_1 \sin \theta_1 + f_2 \sin \theta_2 + f_3 \sin \theta_3 - f_4 \sin \theta_4 + f_{h2} \cos \gamma \\ (M+m) \ddot{y}_G = f_1 \cos \theta_1 - f_2 \cos \theta_2 - f_3 \cos \theta_3 + f_4 \cos \theta_4 + f_{h2} \sin \gamma \\ I' \ddot{\theta}' = l'_1 f_1 - l'_2 f_2 - l'_3 f_3 + l'_4 f_4 + f_{h2} \cdot r_0 \sin(\beta - \gamma) \end{cases} \quad (5.6)$$

動力学方程式(5.6)を式(5.7)のような行列方程式にまとめる.

$$M_0 \ddot{X}_G = K_G^T F + D f_{h2} \quad (5.7)$$

ただし,

$$M_0 = \begin{bmatrix} M+m & 0 & 0 \\ 0 & M+m & 0 \\ 0 & 0 & I' \end{bmatrix}$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]^T$$

$$\ddot{X}_G = [\ddot{x}_G \quad \ddot{y}_G \quad \ddot{\theta}']^T$$

$$D = [\cos \gamma \quad \sin \gamma \quad r_0 \sin(\beta - \gamma)]^T$$

式(5.5)と式(5.7)から, 中心の動力学モデルを式(5.8)で表す.

$$M_0 \cdot K' \cdot \ddot{X} + M_0 \cdot \dot{K}' \cdot \dot{X} = K_G^T \cdot F + D f_{h2} \quad (5.8)$$

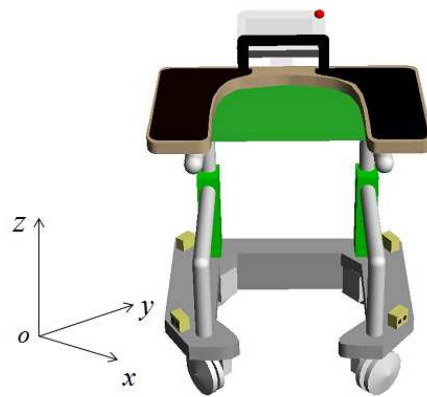
第3章の動力学モデル式(3.9)と比較すると, 式(5.8)の右辺の第2項に推力項が追加されている.

要訓練者によって推力がある場合, 第3章に開発した運動制御法で正確なフィードバック制御を行えないので, 歩行訓練機は目標経路への正しく追従ことが出来ない. しかし, もし訓練者からの推力が力センサーで計測することができれば, 動力学モデル式(5.8)に推力項は既知項となり, 第3章に導出した非線形適応制御法は歩行訓練機に使うことができるようになる. 一方, 推力項が外乱として, 歩行訓練機システムに入れることを考慮し, 新しい歩行訓練機の運動制御法の開発が期待できる.

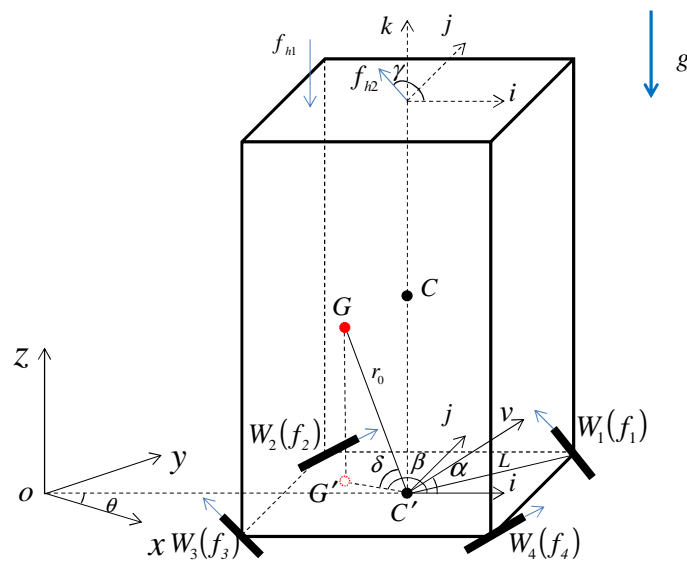
### 5.3 平面運動における三次元モデル

本節では，全方向移動型歩行訓練機は空間に剛体として運動学と動力学分析について述べる．歩行訓練機が平面上の並進運動と自転運動を考慮し，三次元空間の座標系の構築と座標系間のベクトル変換を行い，必要な動力学モデルを導出する[3-5]．

モデルを分析するために，便宜上，歩行訓練機を剛体として簡単化して，三次元モデルは図 5.2 に示す．



(a) 全方向移動型歩行訓練機の構造図



(b) 三次元における歩行訓練機の座標設定

図 5.2 全方向移動型歩行訓練機の三次元モデル

図 5.2 に二つの座標系  $\Sigma_o$  と  $\Sigma_c$  を示している.  $\Sigma_o$  は静止座標系であり,  $\Sigma_c$  は歩行訓練機に固定された回転系.  $C'$  は中心  $C$  が  $o$ - $xy$  平面への投影である. 座標系に各パラメータの定義と単位は表 5.2 に示す.

表 5.2 歩行訓練機のパラメータ

パラメータ	単位	説明
$f_i$	[N]	オムニホイール $i$ の駆動力 ( $i=1,2,3,4$ )
$v$	[m/s]	歩行訓練機の数度
$\alpha$	[rad]	$v$ と $i$ 軸の成す角度
$L$	[m]	$C$ とオムニホイールの距離
$\theta$	[rad]	$i$ 軸と $x$ 軸の成す角度
$r_0$	[m]	$C'$ と $G$ の距離
$I'$	[kg・m <sup>2</sup> ]	システムの慣性モーメント
$M$	[kg]	本体の質量
$f_{h1}$	[N]	要訓練者から歩行訓練機に圧力
$m$	[kg]	要訓練者の等価負荷
$f_{h2}$	[N]	要訓練者から歩行訓練機に推力
$\gamma$	[rad]	$i$ 軸と $f_{h2}$ の作用線の成す角度
$\delta$	[rad]	$\angle GC'G'$

### 【運動学】

歩行訓練機の底面図を図 5.3 に示す.

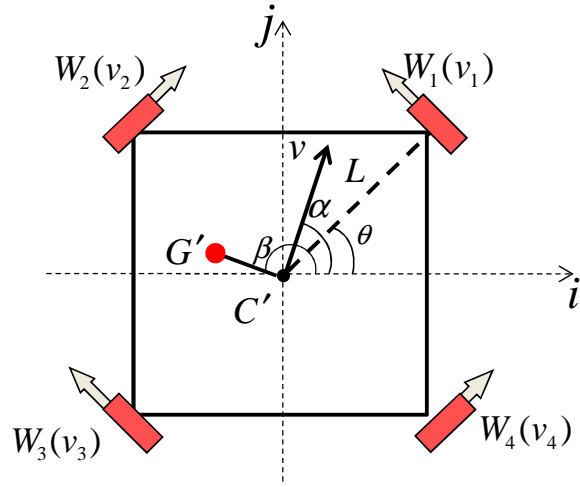


図 5.3 歩行訓練機の底面図

歩行訓練機が転倒しない場合， $\Sigma_c$ における各オムニホイールの位置は

$$\begin{aligned} W_{i1} &= L \cos \frac{\pi}{4} \\ W_{j1} &= L \sin \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$W_{k1} = 0$$

$$\begin{aligned} W_{i2} &= L \cos \frac{3\pi}{4} \\ W_{j2} &= L \sin \frac{3\pi}{4} \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$W_{k2} = 0$$

$$\begin{aligned} W_{i3} &= L \cos \frac{5\pi}{4} \\ W_{j3} &= L \sin \frac{5\pi}{4} \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$W_{k3} = 0$$

$$\begin{aligned}
 W_{i4} &= L \cos \frac{7\pi}{4} \\
 W_{j4} &= L \sin \frac{7\pi}{4} . \\
 W_{k4} &= 0
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

各オムニホイールの速度と  $i$  方向の速度と  $j$  方向の速度と回転速度との関係は

$$\begin{aligned}
 v_i &= (v_1 + v_3) \cos \frac{3\pi}{4} + (v_2 + v_4) \cos \frac{\pi}{4} \\
 v_j &= (v_1 + v_3) \sin \frac{3\pi}{4} + (v_2 + v_4) \sin \frac{\pi}{4} \\
 \dot{\theta} &= (v_1 - v_2 - v_3 + v_4) / 4L
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

$\Sigma_{c'}$  に固定されたシステム重心  $G$  はベクトル  ${}^c P_G = [G_i, G_j, G_k]^T$  で表す.

$$\begin{aligned}
 G_i &= r_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos \beta \\
 G_j &= r_0 \cdot \cos \delta \cdot \sin \beta \\
 G_k &= r_0 \cdot \sin \delta
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

歩行訓練機の運動は、平面において、並進運動と自転運動がある.  $\Sigma_{c'}$  を  $k$  軸を中心とする回転は、 $\theta$  だけ回転されたとすると

$$R_{z\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

$\Sigma_{c'}$  は  $\Sigma_o$  に位置は

$$OC' = [x_c, y_c, z_c]^T \tag{5.16}$$

$\Sigma_o$  から  $\Sigma_{c'}$  への変換, 即ち, 位置も含めた座標変換マトリックス式は式 (5.17) で表す.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x_c \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y_c \\ 0 & 0 & 0 & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

### 【動力学】

三次元空間  $\Sigma_c$  において，歩行訓練機の動力学方程式は以下で与えられる．

$$\begin{cases} (M + m) \ddot{G}_i = -f_1 \cos \frac{\pi}{4} + f_2 \cos \frac{\pi}{4} - f_3 \cos \frac{\pi}{4} + f_4 \cos \frac{\pi}{4} + f_{h2} \cos \gamma \\ (M + m) \ddot{G}_j = f_1 \sin \frac{\pi}{4} - f_2 \sin \frac{\pi}{4} - f_3 \sin \frac{\pi}{4} + f_4 \sin \frac{\pi}{4} + f_{h2} \sin \gamma \\ I' \ddot{\theta}' = l'_1 f_1 - l'_2 f_2 - l'_3 f_3 + l'_4 f_4 + f_{h2} \cdot r_0 \cos \delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \end{cases} \quad (5.18)$$

マトリクス表示を用いると

$$M_0 \ddot{X}_G = K_G^T F + D f_{h2} \quad (5.19)$$

式 (5.19) と前節の二次元モデルの動力学式 (5.7) は同形である．式 (5.19) は回転系  $\Sigma_c$  から静止座標系  $\Sigma_o$  へ座標変換したら，式 (5.7) となる．



## 5.4 空間運動における三次元モデル

歩行訓練時、要訓練者からの推力により、歩行訓練機が転倒してしまう可能性がある。要訓練者の安全のため、転倒を考慮した三次元モデルの導出する必要がある。三次元空間において、歩行訓練機が転倒する時、歩行訓練機は倒立振り子システムとして考えられる。倒立振り子に関する研究はこれまで多く挙げられている[6-8]。本節では、空間に歩行訓練機の転倒を考慮した運動学モデルを構築し、導出した運動学モデルに基づいて歩行訓練機の特徴を検討する。

### 5.4.1 歩行訓練機の転倒条件

本節は、歩行訓練機の転倒を防止する条件を検討する。転倒しない状態を保つ場合、歩行訓練機の静力学式は、次式のように書ける。

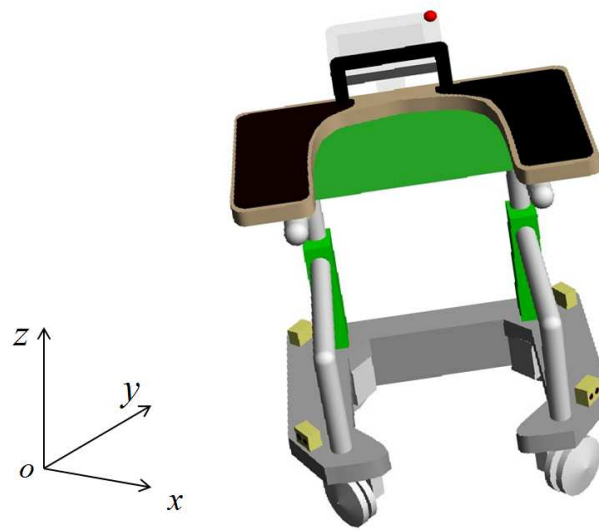
$$\begin{cases} f_{h2} \cdot \cos \gamma \cdot (H - h) - f_{i'} \cdot h = 0 \\ f_{h2} \cdot \sin \gamma \cdot (H - h) - f_{j'} \cdot h = 0 \\ (M + m')g - P = 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

$f_{i'}$ は駆動力の $i'$ 軸への分力であり、 $f_{j'}$ は駆動力の $j'$ 方向への分力である。 $P$ は、地面からの床反力である。 $h$ は重心 $G$ から投影 $G'$ までの距離である。

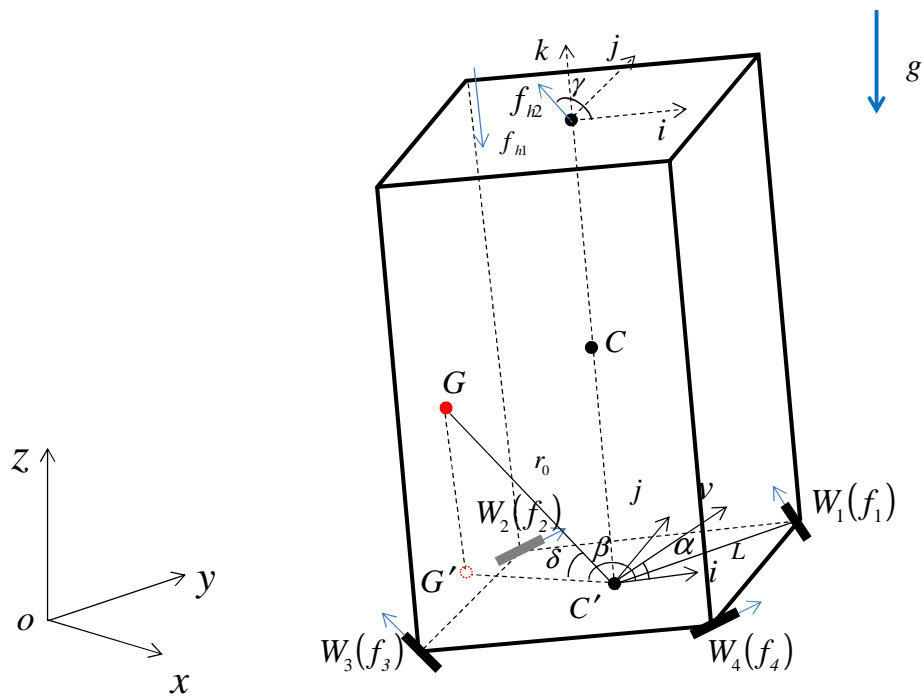
歩行訓練機の転倒条件として、重心 $G$ が地面への投影 $G'$ は歩行訓練機の手輪が成す正方形の外にあることである。歩行訓練機の構造によって実際に歩行訓練機の転倒は、二つの場合がある。一つは、左右に転倒で、もう一つは、前後に転倒である。本節は、それぞれの場合において説明する。

### 5.4.2 左右に転倒する場合

歩行訓練機は、 $j$ 軸まわりに $\phi$  ( $\phi < 0$ ) が回転された場合、歩行訓練機のモデルを図5.4に示す。



(a) 左に傾いた歩行訓練機



(b) 左に傾いた歩行訓練機の座標設定

図 5.4  $j$  軸回りの転倒モデル

図 5.4 のモデルを倒立振子として抽象したら，図 5.5 になる．パラメータの定義は表 5.3 に示す．

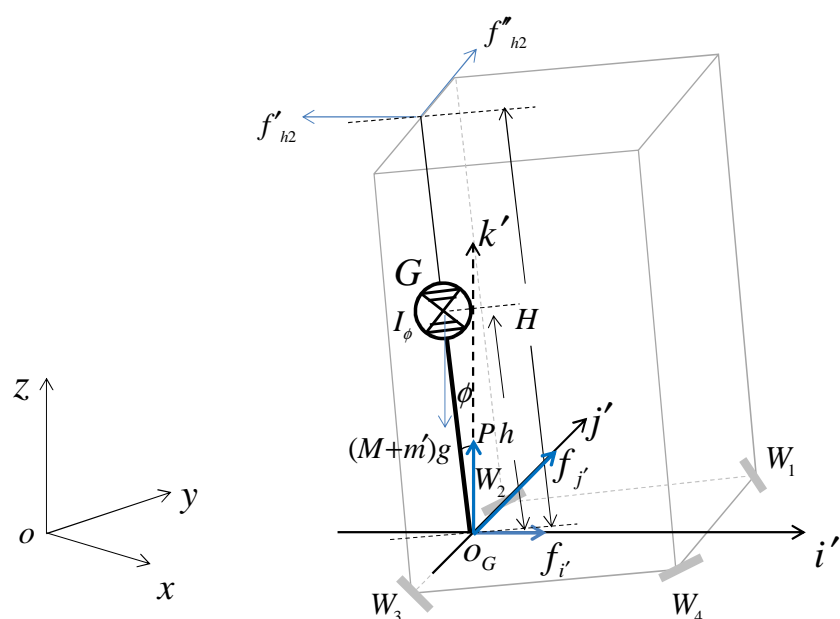

 図 5.5 単純化した  $j$  軸回りの転倒モデル

表 5.3 歩行訓練機のパラメータ

パラメータ	単位	説明
$f_{i'}$	[N]	駆動力の $i'$ 軸への分力
$f_{j'}$	[N]	駆動力の $j'$ 方向への分力
$P$	[N]	地面からの床反力
$f'_{h2}$	[N]	推力の $i'$ 軸への分力
$f''_{h2}$	[N]	推力の $j'$ 軸への分力
$\phi$	[rad]	左右に転倒する角度
$I_\phi$	[kg・m <sup>2</sup> ]	$j$ 軸まわりにシステムの慣性モーメント
$M + m'$	[kg]	システムの質量
$H$	[m]	歩行訓練機の高さ
$h$	[m]	重心と底面の距離

【 $\phi < 0$  の場合,  $f_1 = f_4 = 0$ 】

運動方程式は, 次のようになる.

①  $i'$  軸方向への並進運動

$$f_{i'} + f_{h2}' = (M + m') \frac{d^2}{dt^2} (G_{i'} + h \sin \phi) \quad (5.21)$$

$$= (M + m') \ddot{G}_{i'} + (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\phi} \cdot \cos \phi - (M + m') \cdot h \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi$$

②  $k'$  軸方向への並進運動

$$(M + m')g - P = (M + m') \frac{d^2}{dt^2} (h \cdot \cos \phi) \quad (5.22)$$

$$= -(M + m') \cdot h \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \cos \phi - (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\phi} \cdot \sin \phi$$

③  $j'$  軸まわりに  $\phi$  が回転された場合

$$I_{\phi} \ddot{\phi} = f_{h2}' \cdot (H - h) \cdot \cos \phi + P \cdot h \cdot \sin \phi - f_{i'} \cdot h \cdot \cos \phi \quad (5.23)$$

④  $j'$  軸方向への並進運動

$$f_{j'} + f_{h2}'' = (M + m') \ddot{G}_{j'} \quad (5.24)$$

⑤  $k'$  軸にまわりに  $\theta$  が回転された場合

$$I_{\theta} \ddot{\theta} = -f_2 l_2' - f_3 l_3' + f_{h2} \cdot r_0 \cdot \cos \delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \quad (5.25)$$

$$\phi \ll 1 \text{ の時, } \cos \phi = 1, \sin \phi = \phi, \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 = 0$$

式 (5.21) を整理すると,

$$f_{i'} + f_{h2}' = (M + m') \ddot{G}_{i'} + (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\phi} \quad (5.26)$$

式 (5.22) と式 (5.23) を整理すると,

$$I_{\phi} \ddot{\phi} = f_{h2}' \cdot (H - h) + (M + m') \cdot h^2 \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \ddot{\phi} + (M + m')g \cdot h \cdot \phi - f_{i'} \cdot h \quad (5.27)$$

ただし,

$$f_{i'} = f_2 \cos \frac{\pi}{4} - f_3 \cos \frac{\pi}{4}$$

$$f_{j'} = f_2 \sin \frac{\pi}{4} + f_3 \sin \frac{\pi}{4}$$

$$f_{h2}' = f_{h2} \cdot \cos \gamma \cdot \cos \phi$$

$$f_{h2}'' = f_{h2} \cdot \sin \gamma$$

これらを整理して次式が得られる.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & (M+m') \cdot h \\ 0 & M+m' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\phi - (M+m')h^2\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\phi \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} \cos\frac{\pi}{4} & -\cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} \\ -l'_2 & -l'_3 \\ -h\cos\frac{\pi}{4} & h\cos\frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \\ r_0 \cos\delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ (H-h)\cos\gamma \end{bmatrix} f_{h2}
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

【 $\phi > 0$  の場合,  $f_2 = f_3 = 0$ 】

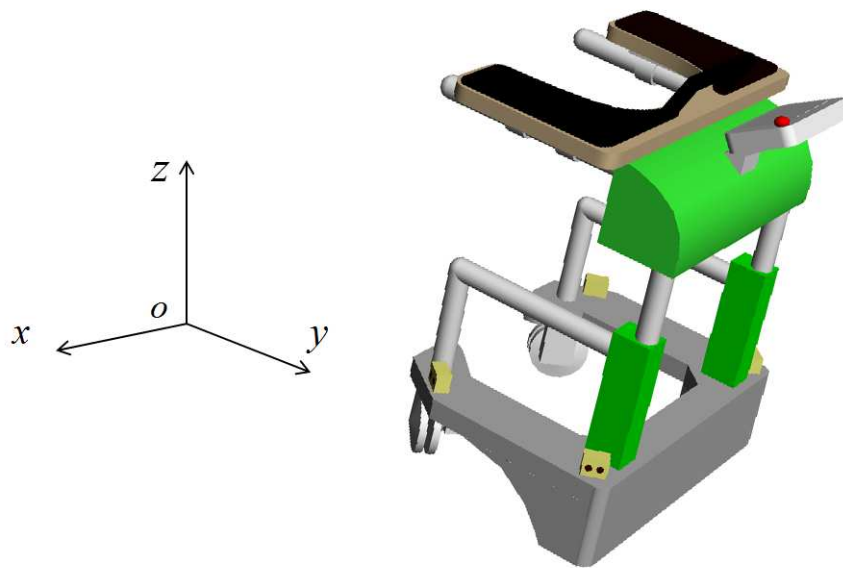
$\phi > 0$  の時, 式 (5.29) になる.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & (M+m') \cdot h \\ 0 & M+m' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\phi - (M+m')h^2\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\phi \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} \\ l'_1 & l'_4 \\ h\cos\frac{\pi}{4} & -h\cos\frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \\ r_0 \cos\delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ (H-h)\cos\gamma \end{bmatrix} f_{h2}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

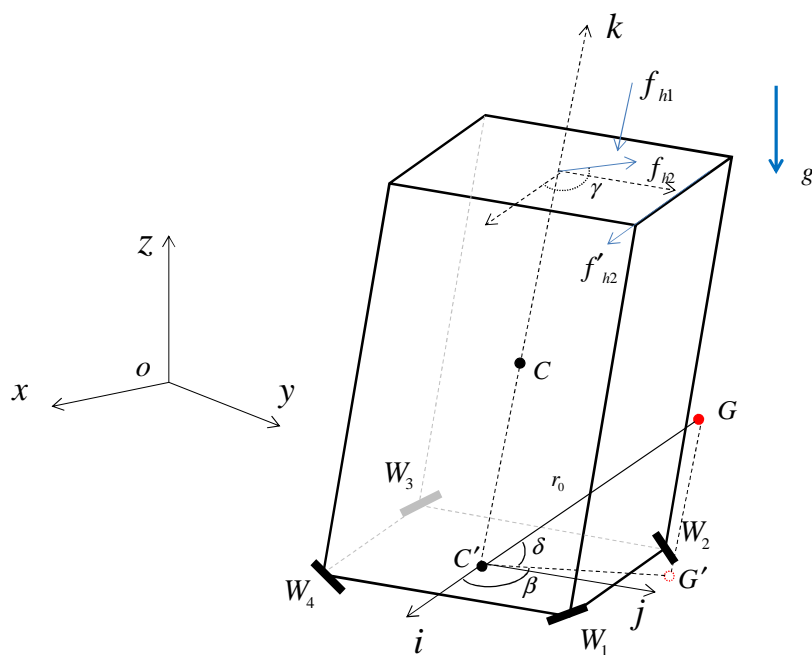
式 (5.28) と式 (5.29) を整理して, 左右に転倒する場合, 次のような表現できる.

$$\begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & (M+m') \cdot h \\ 0 & M+m' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\phi - (M+m')h^2\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_i \\ \ddot{G}_j \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\phi \end{bmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} & -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} \\ l'_1 & -l'_2 & -l'_3 & l'_4 \\ h\cos\frac{\pi}{4} & -h\cos\frac{\pi}{4} & h\cos\frac{\pi}{4} & -h\cos\frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \\ r_0 \cos\delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ (H-h)\cos\gamma \end{bmatrix} f_{h2} \quad (5.30)$$

#### 5.4.3 前後に転倒する場合



(a) 前に傾いた歩行訓練機



(b) 前に傾いた歩行訓練機の座標設定

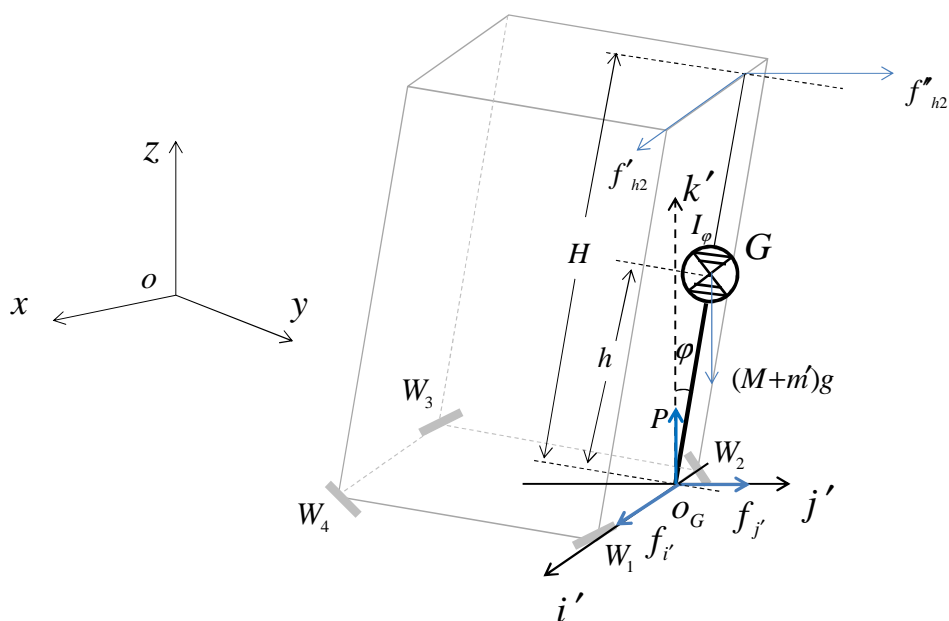
図 5.6  $i$  軸まわりの転倒モデル

図 5.7 単純化した  $i$  軸まわりの転倒モデル

**【 $\varphi < 0$ の場合,  $f_3 = f_4 = 0$ 】**

図 5.7 に各パラメータの定義を表 5.3 にしめす. 運動方程式は, 次のように

なる.

①  $j'$  軸方向への並進運動

$$\begin{aligned} f_{j'} + f_{h2}'' &= (M + m') \frac{d^2}{dt^2} (G_{j'} - h \sin \varphi) \\ &= (M + m') \ddot{G}_{j'} - (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi + (M + m') \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (5.31)$$

②  $k'$  軸方向への並進運動

$$\begin{aligned} (M + m')g - P &= (M + m') \frac{d^2}{dt^2} (h \cdot \cos \varphi) \\ &= -(M + m') \cdot h \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi - (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (5.32)$$

③  $i'$  軸まわりに  $\varphi$  が回転された場合

$$I_{\varphi} \ddot{\varphi} = -f_{h2}'' \cdot (H - h) \cdot \cos \varphi + P \cdot h \cdot \sin \varphi + f_{j'} \cdot h \cdot \cos \varphi \quad (5.33)$$

④  $i'$  軸方向への並進運動

$$f_{i'} + f_{h2}' = (M + m') \ddot{G}_{i'} \quad (5.34)$$

⑤  $k'$  軸まわりに  $\theta$  が回転された場合

$$I_{\theta} \ddot{\theta} = f_1 l_1' - f_2 l_2' + f_{h2} \cdot r_0 \cdot \cos \delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \quad (5.35)$$

$$\varphi \ll 1 \text{ の時, } \cos \varphi = 1, \sin \varphi = \varphi, \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = 0$$

式 (5.31) 整理すると,

$$f_{j'} + f_{h2}'' = (M + m') \ddot{G}_{j'} - (M + m') \cdot h \cdot \ddot{\varphi} \quad (5.36)$$

式 (5.32) と式 (5.33) 整理する後,

$$I_{\varphi} \ddot{\varphi} = -f_{h2}'' \cdot (H - h) + (M + m') \cdot h^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \varphi + (M + m')g \cdot h \cdot \varphi + f_{j'} \cdot h \quad (5.37)$$

ただし,

$$f_{j'} = f_1 \sin \frac{\pi}{4} + f_2 \sin \frac{\pi}{4}$$

$$f_{i'} = -f_1 \cos \frac{\pi}{4} + f_2 \cos \frac{\pi}{4}$$

$$f_{h2}' = f_{h2} \cdot \cos \gamma$$



$$f_{h2}'' = f_{h2} \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi$$

これらを整理して次式が得られる.

$$\begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M+m' & 0 & -(M+m') \cdot h \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\varphi - (M+m')h^2\varphi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\varphi \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\cos \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \sin \frac{\pi}{4} \\ l'_1 & -l'_2 \\ h \sin \frac{\pi}{4} & h \sin \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ r_0 \cos \delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ -(H-h) \sin \gamma \end{bmatrix} f_{h2} \quad (5.38)$$

【 $\varphi > 0$  の場合,  $f_1 = f_2 = 0$ 】

$\varphi > 0$  の時, 式 (5.39) になる.

$$\begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M+m' & 0 & -(M+m') \cdot h \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\varphi - (M+m')h^2\varphi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\varphi \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\cos \frac{\pi}{4} & \cos \frac{\pi}{4} \\ \sin \frac{\pi}{4} & \sin \frac{\pi}{4} \\ -l'_3 & l'_4 \\ h \sin \frac{\pi}{4} & h \sin \frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ r_0 \cos \delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ -(H-h) \sin \gamma \end{bmatrix} f_{h2} \quad (5.39)$$

前後に転倒する場合, 数学モデルは次のようになる.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M+m' & 0 & -(M+m') \cdot h \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\varphi - (M+m')h^2\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\phi \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} & -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} \\ l'_1 & -l'_2 & -l'_3 & l'_4 \\ h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \\ r_0 \cos\delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ -(H-h)\sin\gamma \end{bmatrix} f_{h2} \quad (5.40)
 \end{aligned}$$

式 (5.30) と式 (5.40) 整理して次式が得られる.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M+m' & 0 & 0 & (M+m') \cdot h & 0 \\ 0 & M+m' & 0 & 0 & -(M+m') \cdot h \\ 0 & 0 & I_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_\varphi - (M+m')h^2\phi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_\varphi - (M+m')h^2\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{G}_{i'} \\ \ddot{G}_{j'} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(M+m')gh\phi \\ -(M+m')gh\phi \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} & -\cos\frac{\pi}{4} & \cos\frac{\pi}{4} \\ \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} & \sin\frac{\pi}{4} \\ l'_1 & -l'_2 & -l'_3 & l'_4 \\ h\cos\frac{\pi}{4} & -h\cos\frac{\pi}{4} & h\cos\frac{\pi}{4} & -h\cos\frac{\pi}{4} \\ h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} & h\sin\frac{\pi}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \\ r_0 \cos\delta \cdot \sin(\beta - \gamma) \\ (H-h)\cos\gamma \\ -(H-h)\sin\gamma \end{bmatrix} f_{h2} \quad (5.41)
 \end{aligned}$$

## 5.5 結言

本章では、三次元空間において、推力を考慮した歩行訓練機の運動方程式と動力学方程式を導出した。具体的に、まず、第 2 章と第 3 章に導出された荷重変化と重心ずれの数学モデルに基づいて、推力を考慮した歩行訓練機の二次元モデルを導出した。次に、歩行訓練機は空間にあるので、平面の上に並進運動と自転運動をできる三次元モデルを構築した。最後に、歩行訓練機の転倒問題を考慮し、歩行訓練機が転倒する場合の臨界状態の静力学方程式を導出し、前後に転倒する場合と左右に転倒する場合において、歩行訓練機の三次元モデルを構築した。

今後の課題としては、構築した三次元モデルに基づいて、経路追従精度をさらに向上させるための運動制御法を提案する。

## 参考文献

1. F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi and A.C. Rufer: JOE: a mobile, inverted pendulum, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.49, no.1, pp.107-114, 2002.
2. Y. Ha and S. Yuta: Trajectory Tracking Control for Navigation of Self-Contained Mobile Inverse Pendulum, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1875-1882, 1994.
3. 黒須 茂, 亀岡 紘一, 山崎 敬則: ロボット力学 (メカトロ・エンジニアリング), パワー社, 1997.
4. 遠山茂樹: ロボット工学, コロナ社, 1994.
5. K. S. Fu, R. C. Gonzalez and C. S. G. Lee: Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, Mcgraw-Hill College, 1987
6. M. Baloh and M. Parent, "Modeling and Model Verification of an Intelligen Self-Balancing Two-Wheeled Vehicle for an Autonomous Urban Transportation System," The Conference on Computational Intelligence, Robotics, and Autonomous Systems, 2003.
7. K. Pathak, J. Franch and S. K. Agrawal: Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization, IEEE Transactions on Robotics, vol.21, no.3, 2005.
8. S. Seo, S. Kim, S. Lee, S. Han and H. Kim: Simulation of attitude control of a wheeled inverted pendulum, Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2264-2269, 2007.

## 第6章

### 結論と今後の展開

著者の所属研究室の先行研究では、前方のみではなく複雑な動作群のトレーニングを可能にした全方向移動型歩行訓練機を開発し、臨床試験により有用性が認められている。しかし、理学療法士の運動処方をより充実に実施するには、経路および軌道追従精度をより一層向上する必要がある。

本論文は、全方向移動型歩行訓練機を用いた歩行訓練の効果を得られるため、また安全性を向上させるため、歩行訓練機の運動制御法を開発し、経路追従精度の向上を実現した。

以下に本論文における各章での内容と考察・結論をまとめておく。

第2章では、荷重変化と重心ずれにたいして、歩行訓練機の中心と重心位置が同じであると単純化し、歩行訓練機のモデルを導出し、非線形適応制御法を開発した。シミュレーションにおいて、無荷重と荷重掛けた時、提出した適応制御法を用いて良い経路追従結果を得られた。経路追従精度の向上の効果を確かめるため、シミュレーションにより、PID制御との比較を行った。PID制御のパラメータを無荷重の場合に調整し、荷重掛けた場合、再調整せずに、制御した経路は目標経路から外れていた。提出した非線形適応制御法の有効性を検証した。

第3章では、歩行訓練機の重心が中心より前寄りであることを考慮して、歩行訓練機の数学モデルを精密化した。精密化モデルに基づいて、荷重変化と重心ずれに対して、非線形適応制御法を改善した。シミュレーションでは、無荷重と荷重掛けた場合、ほぼ同じ経路追従結果を得られた。改善した適応制御法は、異なる荷重と重心ずれに対処できることが確認された。第2章に提案した適応制御法は、本章で改善した適応制御法の特例であることを、シミュレーションで検証した。本章の適応制御法の一般性を確認した。

第4章では、制御法のパラメータにおける設定パラメータの自動調整法を提

案する．第2章と第3章に提出した非線形適応制御法のパラメータをマニュアルで調整しているのは時間がかかる上，目標軌道が変わる時，適応制御法のパラメータを再調整する必要がある．本論文では，時間概念を含める経路追従誤差を定義し，NN を基づいてパラメータの自動調整法を提案した．シミュレーションにより経路追従精度の向上が確認されたが，BP には局所的最適解に陥るという問題がある．そこで，GA に基づいて，時間概念を含めた速度も考慮し，経路追従誤差を定義し，非線形適応制御パラメータの自動調整法を提案した．シミュレーションで適応制御法の最適なパラメータを探す．シミュレーションにより手法の有効性を示した．

そのパラメータの最適値は歩行訓練機による実験の参考値として利用した．提出した非線形適応制御法の有効性を確認するため，従来制御（PID 制御）との比較実験を行った．実験結果より，非線形適応制御法は無荷重と荷重掛けた場合，両方とも目標経路によく追従できた．PID 制御では，パラメータを再調整せず，荷重掛けた場合歩行訓練機は目標経路から大きくずれた．利用者が歩行訓練機を使う実験で非線形適応制御法の有効性を示した．

第5章では，さらに経路追従の精度と安全性を向上させるため，三次元空間において，歩行訓練機の運動特徴をよく表現できる三次元モデルの導出した．先ず，第3章の数学モデルによって被訓練者からの作用力の水平分量即ち推力力を考慮して，歩行訓練機の二次元モデルを導出した．次に，歩行訓練機が平面における並進運動と自転運動が表せる三次元モデルを導出した．最後に，歩行訓練機は，三次元空間にある剛体として，自転運動だけではなく，転倒する可能性もあるため，三次元空間における歩行訓練機の転倒問題を倒立振子として抽象し，歩行訓練機の三次元転倒モデルを構築し，転倒条件を示した．

以上を纏める．本論文では，追従誤差の主な原因として考えられる被訓練者からの作用力に着目し，全方向移動型歩行訓練機の運動特徴を分析し高精度の運動制御法を開発した．先ず，中心と重心が一致する平面モデル1を導出し，被訓練者からの荷重の変化と重心ずれを考慮し非線形適応制御法を提案した．次に，モデル1を発展させ，中心と重心が異なる平面モデル2を導出し，非線

形適応制御法の改善法を開発した。さらに、被訓練者からの推力を考慮し、全方向移動型歩行訓練機の三次元モデルを構築した。

今後の展開としては、三次元モデルは、被訓練者の推力と歩行訓練機の転倒を考慮するので、歩行訓練機の高精度制御と、転倒防止の安全性向上に貢献できると考えられる。

以上、歩行訓練機の運動制御について述べた。しかし、歩行障害の原因としては、単なる筋力低下だけではなく、脳と神経に問題があるのは高齢者全体において 58%を占めている。歩行機能の効率的なリハビリテーションを行うためには、筋力や身体バランス等の力学的観点からのみではなく、歩行を制御する神経活動の変化についても考慮する必要があるので、歩行に関する脳機能についても計測した。

本論文は、fNIRS(functional Near-InfraRed Spectroscopy, 機能的近赤外分光法)[1]を用いて、実歩行と仮想歩行による脳活性化の相違を比較して、仮想歩行による歩行リハビリテーションの促進について検討した。左右脚の運動と感覚を司る領域運動野、運動前野および補足運動野を計測した。



(a) 実歩行



(b) 仮想歩行

図 6.1 実験条件

右利き、健常な男性 2 名(SL と ZJ)に協力してもらい、計測を行った。被験者の年齢は、それぞれ 27 歳と 28 歳であった。実験内容は、図 6.1 に示す。実験では、被験者に 60 秒のレストを挟んで実歩行と仮想歩行を行ってもらった。実歩行と仮想歩行の順番の影響を考慮して図 6.2 に示すような 2 つの実験を行った。実験 1 では実歩行～仮想歩行、実験 2 では仮想歩行～実歩行との手順で行った。実歩行では、図 6.1 (a) に示すような被験者が 0.3m/s の速度で、約 6m

の直線を歩いた。仮想歩行では，図 6.1 (b) に示すような歩行ビデオをスクリーンに投射し被験者に見せて，被験者はビデオの中の歩行と同じように自分が歩くことを想像してもらった。ビデオの中の歩行速度は  $0.3\text{m/s}$  であった。

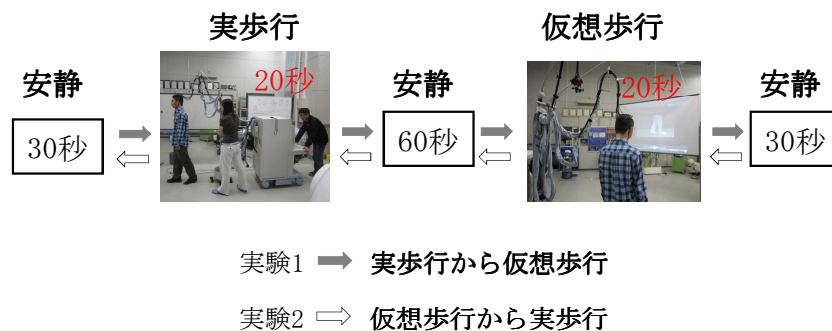


図 6.2 実験順番

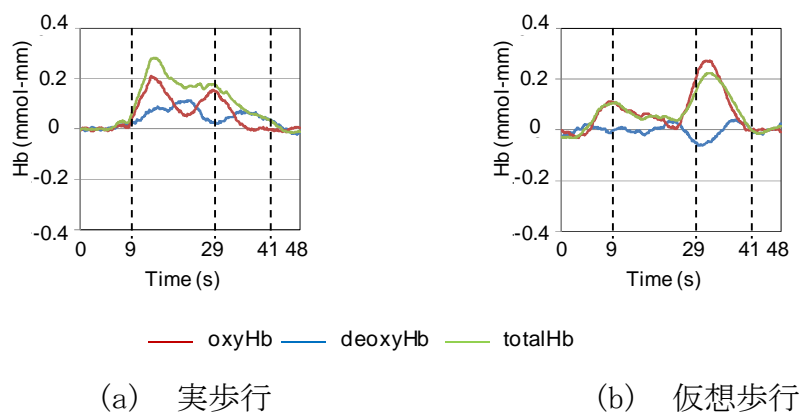


図 6.3 実験 1 の結果

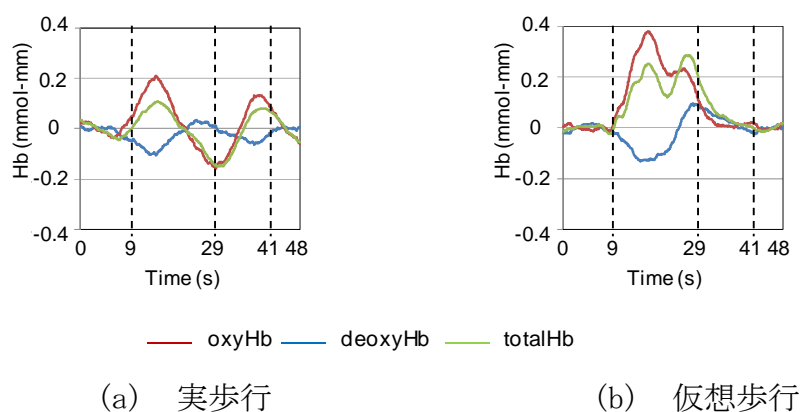


図 6.4 実験 2 の結果

実験 1 と実験 2 における被験者 SL のヘモグロビン濃度変化(Hb)をそれぞれ図 6.3 と図 6.4 に示す。図 6.3 と図 6.4 の横軸は，時間である。実験 1 でも実験 2



でも、仮想歩行と実歩行とともに、oxyHb に顕著な増加が見られた。歩行を想像することにより脳が活性化されることが示された。

被験者 SL と ZJ の平均 oxyHb を表 6.1 に示す。表 6.1 の結果より、oxyHb に個人差があるものの、実験中仮想歩行と実歩行の順番に関わらず、仮想歩行における oxyHb が実歩行における oxyHb より高かったことが分かる。

表 6.1 実歩行と仮想歩行における平均 oxyHb 濃度変化

	実験 1		実験 2	
	実歩行	仮想歩行	実歩行	仮想歩行
被験者 SL	0.027	0.147	0.056	0.114
被験者 ZJ	0.043	0.135	-0.087	-0.062

以上の実験結果により、仮想歩行により大脳皮質の運動野を活性化する可能性が示された。しかし、仮想歩行は、歩行運動を制御するほかの神経経路、例えば小脳と脊髄と末梢神経系への影響はまだ分かっていない。

fNIRS は、大脳皮質の脳血流変化を計測する装置である。本研究の被験者は、健常な若者であった。被験者はトレッドミルにおける歩行は、平坦地での普通歩行で、大脳皮質の運動野及び感覚野は余り機能せずに小脳で脚の運動を制御するので fNIRS の計測信号である oxyHb が低かった。一方、仮想歩行の時、ビデオの中の歩行に合わせて自分の歩行を想像するために、実際に動かなくても意識的に脚の運動を計画する必要があるので、脚の運動を司る運動野の oxyHb は高いと考えられる [2, 3]。

今後では、被験者を増やして、仮想歩行に関わる脳機能を更に精確に検討していく予定である。また、fMRI を用いて、仮想歩行における脳全体の活動を計測したいと考えている。

## 参考文献

1. 酒谷 薫: NIRS - 基礎と臨床, 新興医学出版社, 2012.
2. N. Sharma, V. M. Pomeroy and J. C. Baron: Motor Imagery: a Backdoor to the Motor System after Stroke?, Stroke, vol. 37, no. 7, pp. 1941-1952, 2006.
3. K. Iseki, T. Hanakawa, J. Shinozaki, M. Nankaku and H. Fukuyama: Neural Mechanisms Involved in Mental Imagery and Observation of Gait, Neuroimage, vol. 41, no. 3, pp. 1021-1031, 2008.

## 謝辞

三年前，貴重な留学の機会をくださり，本研究に導き，終始御指導ご激励を賜りました高知工科大学システム工学群王碩玉教授に心より深く感謝いたします．機械出身の筆者に対して，ロボット工学での研究の意義を実感させていただき，研究の態度から研究のプロセスまで，熱心かつ厳格な御指導をいただいたおかげで，本論文の研究成果を挙げることができました．特に，研究への興味と熱意の養成を重視した．ご指導を賜りましたことは貴重な財産となりました．これから，さらに成長した姿をお見せできるよう努力していきたいと思えます．ここに，改めて心より厚く御礼申し上げます．

高知工科大学システム工学群岡宏一教授，芝田京子準教授には，副指導教員と副査としてロボット制御について，多大な助言を賜り，研究者の真剣さを見せていただきました．ここに深く感謝の意を示します．知能機械システム工学科井上喜雄教授，地域連携機構の永野正展教授には副査として有益なご助言をしていただき深く感謝します．審査直前長時間にわたり，永野正展教授から暖かい激励と研究に対する貴重なご指導を賜りました．厚く御礼申し上げます．予備審査の時，四人の先生より貴重な意見を頂き，それから一年間の研究に大変役に立ちました．また高知大学付属病院の石田健司準教授は，医学的立場から全方向移動型歩行訓練機の研究意義を実証し，本研究の基盤を構築しました．本研究を一層深めることができ，嬉しく思います共に，感謝を申し上げます．

高知工科大学システム工学群知能ロボティクス研究室の姜銀来講師には，プログラミングやfNIRS実験の仕方などについて，ご指導をいただき，謝意を申しあげます．研究室の王義娜氏，小山祐貴氏，田中健介氏，渡辺悠人氏とは，お互いの研究について意見を交換する多くの機会を持つことができ，生活上もいろいろお世話になりました．ここに感謝の意を表します．日頃，実験に御協力，学会発表や論文査読に御討論御助言をいただいた大学院生や学部生の多くの方々に深謝致します．博士論文修正において貴重な御応援をいただいた研究室

## 謝辞

渡辺悠人氏，真辺良祐氏，植田慎一郎氏，須賀惇介氏にこころより感謝いたします。

高知工科大学国際交流中心の伴美喜子先生，久保先生，福留園子様及びスタッフから日本語の勉強や，生活の支援や，日本文化の体験などいろいろお手伝いをいただき，高知工科大学の留学生の方々，楽しい留学生活を送ることができるようになり，心から感謝の意を表します。

本研究の遂行に当たり，文部科学省奨学金をいただき，全力で研究に取り込めるように援助していただきました。心より深く感謝いたします。

修士時代の指導先生である中国東北大学柴天佑院士の推薦で，筆者は高知工科大学へ留学できて，博士研究においてもご指導を頂き本当に感謝いたします。末筆ながら，二十年以上苦勞して，筆者の学業を支えていただいた父親と母親に心より深く感謝いたします。

## 本論文に関する研究業績

### 受賞

1. IEEE ICMA AWARD for ICMA 2010 Best Paper in Automation.

Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masanori Nagano, Adaptive Controller for Motion Control of an Omni-directional Walker, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 156-161, August 4-7, 2010.

### 研究論文

1. Yina Wang , Shuoyu Wang , Renpeng Tan and Yinlai Jiang, Motion Control of a Wheeled Mobile Robot Using Digital Acceleration Control Method, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.9, No1, 2013.
2. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Nonlinear Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Dynamic Model Improvement and Experiment, ICIC Express Letters, Vol.6, No3, pp.611-615, March 2012.
3. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan and Yinlai Jiang, Adaptive Control Method for Path Tracking of Wheeled Mobile Robot Considering Parameters Changes, International Journal of Advanced Mechatronic Systems (IJAMECHS), Vol 4, No 1, pp.41-49, 2012.
4. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control for an Intelligent Walking Support Machine, ICIC Express Letters, Vol.6, No.1, pp.145-149, January 2012.
5. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan and Yinlai Jiang, Digital Acceleration Control Method for Path Tracking Control of an Autonomous Mobile Robot, ICIC Express Letters, Part B : Applications, Vol 2, No 6, pp.1267-1272, December 2011.
6. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control with Parameter Optimization by Genetic Algorithm. ICIC Express Letters, Vol.5, No.8(B), pp. 2779-2784, August 2011.

7. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, Masanori Nagano and Masakatsu G. Fujie, Adaptive Control Method For Path Tracking Control of an Omni-directional Walker Considering Center of Gravity Shift and Load Change, International Journal of Innovative Computing, Information and Control. Vol.7, No.7(B), pp. 4423-4434, July, 2011.
8. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, Masakatsu G. Fujie, Adaptive Control Strategy with Parameter Optimization for Omni-directional Walker, Int. J. Mechatronics and Automation. Vol.1, Nos.3/4, pp.172-180, 2011
9. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masanori Nagano, Motion Control of an Omni-directional Walker Using Adaptive Control Method, ICIC Express Letters, Vol.4, No.6(A), pp. 2189-2194, December, 2010.
10. Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Kenji Ishida, Takeshi Ando and Masakatsu G. Fujie, The Possibility of Quickening Walking Rehabilitation by Imaginary Walking, ICIC Express Letters, Part B: Applications, Vol.1, No.2, pp.189-194, December, 2010.
11. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida, and Masakatsu G. Fujie, Adaptive Control Algorithm with Parameter Optimization Using Neural Networks for an Omni-directional Walker, ICIC Express Letters, Part B: Applications, Vol.1, No.2, pp.201-208, December, 2010.

## 著書

1. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Motion Control of Omni-Directional Walker for Walking Support, In Jinglong Wu ed. Biomedical Engineering and Cognitive Neuroscience for Healthcare: Interdisciplinary Applications, pp. 20-28, IGI Global, Hershey, PA, USA, May 2012.
2. Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Kenji Ishida, Takeshi Ando and Masakatsu G. Fujie, Comparison of cortical activation during real walking and mental imagery of walking: the possibility of quickening walking rehabilitation by mental imagery of walking, In Theophanides Theophile ed. Infrared Spectroscopy – Life and Biomedical Sciences, pp.133-150, InTech, 2012.

## 国際学会論文

1. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, An Improved Adaptive Controller with Parameter Optimization by GA for an Omni-directional Walker, Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2012.(will be published)
2. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Adaptive Controller for Omni-directional Walker: Improvement of Dynamic Model, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2011), pp.325-330, Beijing, China, Aug, 2011.
3. Yina Wang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan and Yinlai Jiang, Car-like Mobile Robot Oriented Digital Acceleration Control Method, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2011), pp.1491-1496, Beijing, China, Aug. 2011.
4. Yuto Watanabe, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masakatsu G. Fujie, Adaptive Controller for Motion Control of a Seated Walking Training Machine, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2011), pp.271-275, Beijing, China, Aug, 2011.
5. Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Renpeng Tan, Kenji Ishida Takeshi Ando and Masakatsu G. Fujie, Study of activation in motor cortex during mental imagery of walking using fNIRS, IEEE International Conference on Complex Medical Engineering(CME 2011), pp.637-640, Harbin, China, May, 2011.
6. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masanori Nagano, Adaptive Controller for Motion Control of an Omni-directional Walker, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 156-161, Xi'an, China, Aug, 2010.
7. Renpeng Tan, Shuoyu Wang, Yinlai Jiang, Kenji Ishida and Masanori Nagano, Path Tracking Control Considering Center of Gravity Shift and Load Change for an Omni-directional Walker, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, pp. 672-675, Harbin, China, June, 2010.

## 国内学会論文

1. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 全方向移動型座布団ロボットの運動制御法, 第 30 回 日本ロボット学会 学術講演会, RSJ2012AC4C1-5, 札幌, 2012 年 9 月.
2. 王 義娜, 王 碩玉, 譚 仁鵬, 姜 銀来, 排泄介護支援ロボットの運動制御, 機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会講演論文集 (CD-ROM), K817, 広島, 2012 年 3 月.
3. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 全方向移動型歩行訓練機の運動制御法の改善, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2011 講演論文集 (CD-R), paper\_175, 東京, 2011 年 11 月.
4. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 歩行支援機の運動制御 - デジタル加速度制御法による経路追従精度の向上, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2011 講演論文集 (CD-R), paper\_182, 東京, 2011 年 11 月.
5. 渡辺悠人, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 重心位置の変化を考慮した座位歩行訓練機の運動制御, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2011 講演論文集 (CD-R), paper\_186, 東京, 2011 年 11 月.
6. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 中心座標系における歩行訓練機の適応制御法, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, pp. 1485-1486, 愛知県 2011 年 11 月
7. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 非線形摩擦と荷重変化に対応する歩行支援機の運動制御法, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, pp. 1483-1484, 愛知県, 2011 年 11 月.
8. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 荷重変化を考慮した全方向移動型歩行訓練機の走行制御, 第 29 回 日本ロボット学会 学術講演会, RSJ2011AC2H1-7, 東京, 2011 年 9 月
9. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, デジタル加速度制御法に基づく歩行支援機の運動制御, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2011AC2H1-8, 東京, 2011 年 9 月.
10. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 全方向移動型歩行訓練機の走行制御, 日本機械学会 [No. 11-2] Dynamics and Design Conference September 2011 CD-ROM 論



- 文集, no. 322, 高知, 2011 年 9 月.
11. 王義娜, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, デジタル加速度制御法による車輪型移動ロボットの経路追従制御, 日本機械学会[No. 11-2] Dynamics and Design Conference September 2011 CD-ROM 論文集, no. 318, 高知, 2011 年 9 月.
  12. 渡辺悠人, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克重心移動を伴う座位歩行訓練機の運動制御, 日本機械学会[No. 11-2] Dynamics and Design Conference September 2011 CD-ROM 論文集, no. 145, 高知, 2011 年 9 月.
  13. 渡辺悠人, 王碩玉, 譚仁鵬, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克, 重心のずれを有する座位歩行訓練機の運動制御, 第 16 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, E3, 高知, 2011 年 9 月.
  14. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 歩行補助機走行制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-G01(1-2), 岡山, 2011 年 5 月.
  15. 姜銀来, 王碩玉, 譚仁鵬, 石田健司, 安藤健, 藤江正克: 仮想歩行における運動野の賦活に関する検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-H10(1-2), 岡山, 2011 年 5 月.
  16. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 三浦直樹, 石田健司, 藤江正克: 歩行訓練機の制御パラメータの自動調整, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会 講演論文集, No. 115-1, pp. 23-24, 岡山, 2011 年 3 月.
  17. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 全方向移動型歩行訓練機の適応制御パラメータの自動調整. 第 53 回自動制御連合講演会 2010, pp. 1272-1273, 高知, 2010 年 11 月.
  18. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 全方向移動型歩行訓練機の適応制御法. 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2010AC2P1-5, 名古屋, 2010 年 9 月.
  19. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 石田健司, 藤江正克: 適応制御法に基づく全方向移動型歩行訓練機の運動制御, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集, pp. 514-515, 大阪, 2010 年 9 月.
  20. 姜銀来, 王碩玉, 譚仁鵬, 石田健司: 仮想歩行による歩行リハビリテーションの可能性, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集, pp. 284-285, 大阪, 2010

年 9 月.

21. 譚仁鵬, 王碩玉, 姜銀来, 三浦直樹, 石田健司: 荷重変化を考慮した全方向移動型歩行訓練機の経路追従制御, 日本機械学会中国四国支部 第 48 期総会・講演会 講演論文集, pp. 323-324, 広島, 2010 年 3 月.