

博士論文

即応的な跳躍打撃動作を行う
空気圧ロボットの構成法

田中 一敏

概要

本研究では、不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作を行うことで危機回避等を達成可能なヒューマノイドロボットの実現に向けて、その代表例として、事前に確定していない軌道とタイミングで飛来するボールに即応し、跳躍し空中で打撃する腕付二脚ロボットの構成法を扱う（1章）。

主な課題は、(1) 極めて短時間での適切な跳躍・打撃動作計画、(2) 計画軌道に沿った全身跳躍の実現、および(3) 確実なボール打撃のための運動中の誤差補償である（2章）。これについて本研究では、(A) 軽量大ストローク空気圧駆動系とそれを用いた腕付二脚ロボットの設計法（3章）、(B) 同駆動系の特性を考慮した全身動作学習（4章）、生成法および運動中の誤差補償のための高速な過渡的動作の調節法（5章）を中心とする解決策を提示する。

3章では、ナイロン製造形部品による重量部品の代替と構造一体化による軽量化、頑健でコンパクトなワイヤ固定法やワイヤ経路決定法等の工夫、および空気圧の動的変化を考慮した設計パラメタの選択によって、跳躍打撃動作に要求される身体仕様が実現可能であることを示す。4章および5章では、運動軌道の類似性に基づく分類を特徴とする状態—指令・時間写像の生成、運動指令の切り替えタイミング修正による運動調節、およびこれらを多自由度実機に適用するための疑似訓練データ生成法によって跳躍打撃動作が達成可能であることを示す。6章において実機による即応的な跳躍打撃動作の実験を通じて提案する構成法の有用性を示し、7章において得られた知見を総括し、意義を展望を述べる。

以上のように、本論文は腕付脚式ロボットの即応的な跳躍打撃動作に焦点を絞って実現方法を具体的に示し、即応的でダイナミックな全身動作を行うヒューマノイドロボットの実現への端緒を拓いた。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.1.1	汎用脚式ロボットに対する社会的要請	1
1.1.2	学術的意義	3
1.2	目的と方法	6
1.3	論文構成	6
第 2 章	即応的全身ダイナミック動作に関連する知能ロボット技術	9
2.1	ロボットによる跳躍打撃動作の概要	9
2.2	多様なダイナミック動作を行うロボットの身体設計	10
2.2.1	軽量高出力なロボット駆動系	11
2.2.2	ダイナミック動作を行う空気圧ロボットの設計	14
2.3	空気圧ロボットによる過渡的な加速動作の生成法	15
2.3.1	ロボット全身運動の計画と制御	15
2.3.2	ダイナミック動作の制御と学習	17
2.3.3	予測に基づくロボットの行動計画	18
2.3.4	後続するダイナミック動作の性能を決定づける身構え	19
2.4	空気圧ロボットによる過渡的な加速運動の調節法	20
第 3 章	即応性を備えた空気圧ロボットの設計法	21
3.1	跳躍打撃動作に要求される設計仕様の検討	21
3.1.1	実験条件	22
3.1.2	身体モデルに基づく跳躍打撃動作の軌道生成	22

3.1.3	跳躍打撃動作の定量的解析	32
3.1.4	打撃範囲を増大する運動特徴	34
3.1.5	身体的特徴が跳躍打撃動作性能に与える影響	38
3.2	軽量大ストローク空気圧駆動機構の開発	39
3.2.1	構造一体型空気圧駆動系の提案	40
3.2.2	提案機構の実装法	42
3.2.3	出力重量比の評価	47
3.3	速度と加速度を最大化する空気圧駆動系設計法	50
3.3.1	空気ダイナミクスを考慮した設計パラメタの決定	51
3.3.2	空気の動的変化を考慮した設計パラメタ最適化	54
3.3.3	ストロークを最大限に活用する設計方法	58
3.3.4	オリフィス径が運動速度に与える効果	59
3.4	提案駆動機構を備えたロボットの開発	62
3.4.1	ロボット四肢の開発	62
3.4.2	全身ロボットの開発	67
第 4 章	空気圧ロボットが行う即応的動作の生成法と調節法	73
4.1	空気圧ロボットの過渡的ダイナミック動作学習	73
4.1.1	軌道分類を用いた状態遷移学習	74
4.1.2	空気圧腕ロボットのスイング動作学習	76
4.1.3	多様な跳躍動作の学習	79
4.2	即応的全身ダイナミック運動のための初期姿勢生成	81
4.2.1	打撃可能領域を最大化する身構え生成法	82
4.2.2	確率的な目標状態のための初期姿勢調節法	83
4.2.3	空気圧ロボットの動作開始加速度を最大化する初期内圧調節法	92
4.2.4	即応ダイナミック動作待機行動に関する考察	97
4.3	運動指令切り替えタイミングの修正による運動調節法	104
4.3.1	提案するタイミング調節法	105
4.3.2	多様な打撃が要求する過渡的移動動作のパターン数	106
4.3.3	単純モデルを用いた基礎的検討	107
第 5 章	跳躍打撃動作の学習法と調節法	111

5.1	跳躍打撃動作の学習法	111
5.1.1	分類と順モデルを用いた状態・指令関係学習法	111
5.1.2	跳躍打撃動作学習シミュレーション	112
5.2	跳躍打撃動作の運動調節法	115
5.2.1	ヒューマノイドロボットにおける運動調節法	116
5.2.2	誤差が打撃結果に与える影響	122
5.2.3	動作生成と運動調節の同時学習法	125
第 6 章	腕付脚式ロボットの跳躍打撃動作実験	133
6.1	提案身体設計法の要求充足性検証	134
6.1.1	空気圧腕付脚式ロボットの開発	134
6.1.2	異なるボール軌道に対する跳躍打撃実験	137
6.2	提案する動作生成法と調節法の有用性検証	140
6.2.1	跳躍打撃動作を行うロボットの情報処理	140
6.2.2	カメラを用いた軌道予測性能の評価実験	141
6.2.3	跳躍打撃動作の学習・生成・調節実験	143
第 7 章	結論	153
7.1	得られた知見	154
7.2	意義	156
7.3	展望	157
付録 A	業績一覧	161
謝辞		165
参考文献		167

目次

3.1	Humanoid model.	23
3.2	Inverted pedulum model.	25
3.3	Inverted pedulum model at half time of the jumping.	25
3.4	Trajectories of center of gravity in sliding phase.	27
3.5	Ground reaction force changed by three parameters.	28
3.6	Position, velocity and acceleration of center of gravity.	29
3.7	Trajectories of center of gravity changed by three parameters.	29
3.8	Snapshots of jumping motion.	33
3.9	Snapshots of hitting motion.	34
3.10	Hitting positions, landing positions and a balltrajectory.	35
3.11	Velocity of hitting parts and ball at hitting time and after hitting.	36
3.12	Velocity of hitting parts at hitting.	36
3.13	Comparison of motion strategies.	37
3.14	Comparison of physical characteristics of robots.	40
3.15	Histogram of parameters A used a pneumatic humanoid robot and a typical humanoid robot.	41
3.16	Histogram of x and z component of velocity of the robot at its landing.	42
3.17	Appearance of a structure-integrated pneumatic cable cylinder.	43
3.18	Structure of a piston.	44
3.19	Structure of the structure-integrated pneumatic cable cylinder.	45
3.20	Mass composition of typical cylinders and proposed ones.	48
3.21	Mass composition of typical cylinders, nylon cylinder and proposed ones.	49

3.22	Force to weight ratios of wire cylinders are higher than typical ones.	51
3.23	Model with a pneumatic cylinder actuating one rotary joint.	52
3.24	Pressure in the chamber A increased once and decreased.	55
3.25	Velocity of the trunk at the end of motion increased.	56
3.26	Parameters of the model of the link with a reduction pulley and a structure-integrated pneumatic cable cylinder.	58
3.27	Velocity of the trunk at the end of motion increased as the ratio of increased.	58
3.28	Length of cylinder tube decreased as l_{MA} increased.	59
3.29	Piston velocity at the end of motion.	61
3.30	Orifice maximizing motion velocity.	61
3.31	Appearance of the robotic arm and the leg.	64
3.32	Displacement of joint angle of the robot arm.	65
3.33	Position and Velocity of center of trunk of a robot.	66
3.34	Snapshots of jumping motion.	66
3.35	Ground reaction force of jumping of a one-leg robot.	67
3.36	Apearance of a robot with two arms and two legs.	68
3.37	Dimensions and joint composition of a robot with two arms and two legs.	69
3.38	Snapshots of hit motion of the robot with its left arm.	70
4.1	Proposed learning method.	74
4.2	Comparison of error of prediction with four methods.	77
4.3	Angle error comparison.	78
4.4	Swing of a robot arm with pneumatic cylinders.	79
4.5	Angle and angular velocity error of swing motion.	79
4.6	Initial posture of the robot model with one leg in simulations.	80
4.7	Regression error of angle and angular velocity in jumping motion.	80
4.8	Position of a hitting parts at hitting with different initial posture.	83
4.9	Robotic arm model with one degree of freedom.	87
4.10	Robotic arm model with two degree of freedoms.	87
4.11	Maps of qMTTTS and approximate qMTTTS.	89

4.12	Approximate error verification.	90
4.13	Relationship between Dimension and qMTTTS.	90
4.14	Relationship between number of states in TSG and qMTTTS with a one DOF model.	91
4.15	Relationship between number of states in TSG and qMTTTS with a two DOFs model.	91
4.16	Robotic arm model used in simulations.	93
4.17	Peaks of angular velocity.	94
4.18	Appearance of the robot arm with PAMs.	95
4.19	Specification of the robot arm with PAMs.	95
4.20	Increasing maximum angular velocity as increasing initial pressure. . .	96
4.21	Decreasing maximum angular velocity as increasing initial pressure. .	96
4.22	MTTTS maps.	101
4.23	Changing difference of expected value of MTTTS by error of prediction.	102
4.24	Increasing distance between two approximate boundary lines as de- creasing size of population variance.	104
4.25	Idea of motion adjustment	105
4.26	Hiitable area with number of jump patterns.	107
4.27	Position and velocity of center of gravity of the robot at landing with wide hit motion.	107
4.28	Model of a robot in the air.	108
4.29	Snaphots of hitting motion of the model in the air.	108
4.30	Error of hitting with/without adjustment by a flying robot model. . . .	110
5.1	Snapshots of jump hit motion in simulations.	112
5.2	Inner pressure of jump hit motion in simulations.	113
5.3	Prediction of clusters of output commands.	114
5.4	Hand trajectories and its predicted positions.	115
5.5	Comparison of learning method.	116
5.6	Appearance of the robot model.	117
5.7	Joint composition and link length.	117

5.8	Snapshots of hitting motion of the robot model.	119
5.9	Ball landing positions with measurement errors and without motion adjustment.	121
5.10	Hitting failed with measurement errors in most case.	122
5.11	Adjusted hitting succeeded with measurement errors in most cases.	123
5.12	8.4 times of number of errors could be hit with adjustment.	124
5.13	Linear relationships in hitting parts' positions.	125
5.14	Linear relationships in hitting parts' velocity.	126
5.15	Linear relationships in vectors orthogonal hitting surface.	127
5.16	R^2 of regression using adjustment parameters are higher than using errors.	127
5.17	Posture of the robot model at hitting.	128
5.18	Larger changes of hitting positions caused by timing errors than on ball landing positions and ball flying period after hitting.	129
5.19	Linear relationships between errors of hitting part's velocity at hitting and ball landing positions and ball flying period after hitting.	129
5.20	Posture errors occurred larger changes of ball landing positions are occurred than timing errors and velocity errors.	129
5.21	Adjustment target positions by learning.	130
5.22	Clustered output commands and switching time.	130
5.23	Effects of error compensation.	131
6.1	Drawing of the jump hit robot.	135
6.2	Joint composition of the jump hit robot.	136
6.3	Air piping of the robot.	137
6.4	Appearance of the jump hit robot.	138
6.5	Appearance of a pitching machine.	139
6.6	Appearance of a supporting base.	139
6.7	Initial posture of the robot before jump hit motion.	139
6.8	Snapshots of jump hit motion (center).	145
6.9	Snapshots of jump hit motion (right).	145
6.10	Different hand and ball trajectories in jump hit motion.	146

6.11	Flow chart of jump hit motion.	147
6.12	Output commands and phase structure of jump hit motion.	148
6.13	Information processing flow with cameras.	148
6.14	Snapshots of stand hit motion in training.	148
6.15	Snapshots of stand hit motion in tests.	148
6.16	Pressure in chamber in jump hit motion.	149
6.17	Snapshots of jump hit motion in training.	149
6.18	Prediction of hand position in training.	150
6.19	Command and switching time in training.	150
6.20	Information processing flow with motion capture systems.	150
6.21	Snapshots of jump hit motion in tests (center).	151
6.22	Snapshots of jump hit motion in tests (right).	151
6.23	Snapshots of jump hit motion in tests (left).	151
6.24	Ball and hand trajectories in tests.	151
6.25	Time chart of jump hit motion.	152
6.26	Ball trajectory prediction.	152

表目次

3.2	Parameters of initial posture.	22
3.1	Model link parameters of a model in the sagittal plane.	23
3.3	Collision model parameters.	31
3.4	Link parameters of the model of typical humanoid robot.	38
3.5	Materials of the cylinder.	46
3.6	Parameters of cylinders.	50
3.7	Calculated force of cylinders.	50
3.8	Specification of the robotic limbs.	65
3.9	Range of motion of the robot.	70
3.10	Specification of the humanoid robots.	71
4.1	Specification of a One DOF PAM robot arm.	95
4.2	Parameters of a model in the air.	108
5.1	Mass of each link in the humanoid robot model.	117
5.2	Jumping and hitting motion parameters.	120
6.1	Specification of the two legs robot.	138

第 1 章

序論

本論文の序論である本章では、まず本研究の背景として、汎用脚式ロボットへの社会的要請、および跳躍打撃ロボット研究の学術的意義について述べる。続いて、本研究の目的と方法について述べる。最後に、本論文の構成を示す。

1.1 背景

本研究では、不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作を行うことで、危機回避等を達成可能なヒューマノイドロボットの実現に向けて研究を行った。そのような動作の代表例として、事前に確定していない軌道とタイミングで飛来するボールに即応し、跳躍し空中で打撃する腕付二脚ロボットの構成法が本研究の課題である。

1.1.1 汎用脚式ロボットに対する社会的要請

ここではまず、近年のロボット技術の社会実装が進展する状況を確認する。次に、汎用脚式ロボットが将来的に社会実装される可能性について検討する。加えて、汎用脚式ロボットが社会実装される際に要求される実時間応答性について述べる。

知能ロボット社会実装機運の高まり

近年、ロボット技術の社会実装が急速に進んでいる。Baxter [27] や Nextage[172] など、工場などで人間と共同作業を行うロボットは既に市販、導入されている。Pepper [168] などの移動能力を有するサービスロボットも実際に店舗等に導入されている。

自律的に移動する飛行体，車輪体も導入が進んでいる．ロボット演劇 [167] や，ロボット漫才 [174] も行われており，従来想定されていない様々な領域へのロボットの社会実装が進んでいる．このようなロボット技術の適用範囲はより拡大すると考えられる．

ロボット工学の究極的な目標の1つとして，人間のように働くロボットの実現が挙げられる．これは，人間の職場に導入するための設備変更を必要せず，自然言語などの直感的な方法で仕事を指示でき，汎用的な仕事を行うロボットである．現在までに，このようなロボットは実現されていない．しかし，実現に向けた要素技術の発展は急激に加速している．この事例として第一に，工場などにおけるシステム化，機械化と並行して，汎用的な機械，同一の身体で異なる作業を行うロボットの導入が進んでいることが挙げられる [172]．現在では，画像認識技術の発展によって，物体を高速，高精度に識別できるため [22]，ロボットの物体操作性能の発展との相乗効果によって，汎用な作業能力を行うロボットの活用は加速すると考えられる．第二に，脚式ロボットの性能向上が挙げられる [62]．人間と同等の姿勢維持と移動能力を備えた二脚式のロボットの実現によって，狭隘な環境でのロボット運用が可能になる．第三に，ロボット技術に対する導入の易化が挙げられる．プラットフォーム化，オープンソースの共有が進んでおり，安価で手に入る計算機，RGBD カメラも販売されている．安価で人間に親和的なロボットも販売され，ロボットソフトウェアが今後加速度的に発展する可能性がある．ここまで，汎用脚式ロボットが社会実装される可能性について述べた．次目では，このようなロボットに要求される能力について述べる．

人間を含む環境が要請するロボットの実時間応答性

実世界において，時間の経過とともに，状況は絶えず，不可逆に変化し続ける．この不可逆に変化し続ける環境でタスクを行う脚式汎用ロボットは，人間，物体，および自身の破損や消失を回避する必要がある．このため，ロボットはそれらに迫る危険を察知し，即座に，かつ俊敏に運動し，危険を取り払う必要がある．

自動運転車や車輪型サービスロボットなど，人間を含む環境，例えば街中や屋内で使われる車輪型ロボットには，衝突を避けるための人間の認識，運動予測，停止の情報処理が組み込まれる．

これらの方法については，現在でも研究が盛んに進んでおり [182, 183]，人間環境におけるロボット運用の重要な技術の1つである．

工場などで作業を行うロボットも同様に、人間と衝突を避ける、衝突を検知して停止する、人間の干渉後も実時間で軌道を修正する手法も提案された [34].

これらの研究は、ロボットが人間を傷つけないように、実行中のタスク、およびタスク達成のための運動を停止、調節するための方法である。しかし、実際に人間環境においてロボットが運用される状況を考えた場合、ロボットは人間や環境中の物体に危険が及ぶことを予期、認識し、それを防ぐための運動を行い、それまでに計画されていない運動を新たに計画し、実行しなければならない。このような不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作を行うロボットの研究は、これまでにないため、本研究ではこの実現に向けた技術的な課題に取り組む。

1.1.2 学術的意義

本項では、一般的なモデルに基づく運動計画と制御によって運動する汎用脚式ロボットの技術発展と現状について確認し、全身で状況に即応する運動を行う可能性について言及する。続いて、比較的新しい概念である創発的なロボット研究について説明し、状況適応的な枠組みへと拡張する必要性について述べる。最後に、近年盛んなソフトロボットの特徴について述べ、学習を用いた動作生成法が必要であることを述べる。

汎用脚式ロボット研究の現状

脚式ロボットに関する主な課題として、脚式移動運動、全身協調が挙げられる。姿勢維持、上肢での力の発揮や物体の扱いは、脚式ロボットの文脈では全身協調の一部として扱われる [124]。上肢の運動を姿勢維持に対する外乱として捉え、それを打ち消す方法として全身協調は位置づけられる。汎用脚式ロボット研究は、ZMP を用いた予見制御の研究以降 [50]、現在の状況が与える拘束下で二次計画法などを用いて運動を計算する数理的手法 [25] や、駆動機構 [101]、統合システム [94, 114] の研究として進んできた。環境情報の認識 [131]、足位置の計画 [61]、環境との力のやり取り [124] などの問題が解かれ、不整地も含めて多様な環境で移動し [92]、作業 [2] することが可能になった。

緊急危機回避などの即応的な全身運動を行う場面では、事前に完全には知り得ない変化に対して、即座に運動を計画し、行動する必要がある。身体性能の限界や制御の

安定性保証から受ける速度，加速度，トルクの上限などの身体的な制約，特に複数歩の移動が必要で，かつ上肢反復的な計算が必要であり，自身の身体を空中に投げ出した状態でタイミングよく高速な運動を行うのであれば，反復的な計算が必要不可欠であり，事前計算や学習などが有利である．このため，従来の制約充足と最適化の反復計算によって計画した軌道を高周期の制御によって保証する枠組みにとらわれない，新たな手法が必要である．本研究では，これらの手法を運動探索等で利用した．学習を用いた反復的な計算によって運動規範を自律的に獲得する研究は，汎用脚式ロボットの適用範囲を拡大すると同時に，一方で解析的な指標のあり方に示唆を与えることが期待される．

創発的運動知能における状況適応

複雑で不確かな実世界において知的な振る舞いを行うロボットを創造する方法として，運動創発が挙げられる [156]．アクチュエータや計算なしに特定の環境下で歩行運動を行う受動歩行器 [18] に代表される“形態による演算” [104] という考えがある．これは，知的な振る舞いは身体，環境，神経系の相互作用によって創発されるという考えである．これは，神経振動子を用いた歩行など [58]，低次の反射系や特定の状況下で一定の成果を得ている．今後これをより高次の知能への拡張していくためには，過去の経験を新規な状況に応用していく枠組みが必要である．

近年，ソフトロボットと呼ばれる種類のロボットの研究が活発である [105]．安価で柔軟なアクチュエータはロボット適用可能範囲をこれまでにない領域へと拡大する．柔軟な身体をモデル化し，制御する方法も提案されている [67]．柔軟身体の利点として，環境との衝突で生じる衝撃が小さいことが挙げられる．状況に応じた振る舞いをオープンループで行う方法が確立できれば，その利点を活用できる．すなわち，機構的自由度としては非常に多くの自由度を備え，多くの場合に劣駆動系である身体を，自律的な運動獲得によって，状況即応的に振る舞わせることが可能になる．本研究において，オープンループな運動を状況適応的に行う方法を提案することで，柔軟ロボットの動作生成方法として応用できると考えられる．

ロボット工学が与える人間理解

汎用脚式ロボットのうち，二脚二腕で人間と大きさ，重量，比率の近いものは，人間を理解するための道具として使われている [16]．モデルを構築し，動作させること

で対象を理解する構成論的アプローチ [171] がある。汎用脚式のロボットはこのモデルとなりうる [16]。人間と同等の筋骨格構造を備えたロボットも発展し続けており [7]、人間の身体内部の神経的、物理的相互作用を高精度に推定する手法も進んでいる [76, 75]。人間が行う運動の生理的、物理的な原理理解にロボット工学の発展は寄与していくと考えられる。

社会的相互作用においても同様に、人間に酷似したロボットを用いることで、人間存在を科学する取り組みも盛んである [9]。計測技術の発展によって人間の運動を大規模、詳細に計測することが可能になった。スポーツなどで計測情報の分析、定量的な評価も行われている [150]。現状、これらは事後的な説明にとどまっているが、将来的には、ロボット工学から派生した人間の詳細な運動モデルや、神経系、すなわち、注意 [48]、意思決定などの認知モデルと統合され、予測性をもつ計算論モデルとして、人間の運動は扱われると考えられる。それに向けて、特定の状況下にある主体が自己の運動可能性や与えられた目的、欲求から行動、運動を選択するモデルが必要である。現存するロボットの行動、軌道計画はこれに貢献すると期待される。実際、全方向車輪型ロボットの行動計画はアナロジーとして適用可能である [139]。これらに加えて、筋骨格系が備えた身体的特性や認知的特性を反映するとともに、学習した運動と自身の運動可能性を行動選択に反映する枠組みが必要とされることが考えられるため、本研究はこれに向けて、時間的に逆算可能な状態遷移の学習に取り組む。

ダイナミック運動ロボットの趨勢

最大運動速度は、ロボットの身体性能指標として用いられる [14]。ロボットが高速運動を行う主な利点として、移動速度や、作業速度を向上することが挙げられる。一方、ロボットが加速運動を行う利点として、物体の加速度変化によって、持ち替えなどで静的な状態変化では経由できない状態を経由できること [32]、移動において自身の身体を空中に浮かせることで、踏破可能な領域を増加させることなどが挙げられる [142]。ここではロボットの運動によってのみ環境、および環境とロボットの関係性が変化する。これらに加えて、ロボットが適応可能な状況変化の種類が増加するという点が、ロボットが高速運動、加速運動を行う利点として挙げられる。本研究では、ロボットが過去の運動経験を活用して動的な環境変化に適応する観点から、この点に着目した。

ロボットの高速、加速度的な運動は、ダイナミック運動と呼ばれる [68]。これま

で、ロボットのダイナミック動作として、連続跳躍 [112, 118], 歩行 [50, 146], 走行 [134], バク宙 [81, 107], 猫ひねり [163], 動的起き上がり [64], 棒高跳び [89], 投擲 [123], ジャグリング [119], 打球 [78, 122], 捕球 [8] など様々なダイナミック動作が実現されてきた。脚式ロボットが支持状態を切り替えながら、状況適応的に行うダイナミック動作は、これまで実現されていない。ロボットが行う全身でのダイナミック動作として、人間や物体を守るために走行, 跳躍し, それらを掴む, 支える, 危険から自分の身を守るために姿勢変化や移動によって回避するなどが考えられる。本研究ではこれを即応的全身ダイナミック動作と呼ぶ。さらに, 他の即応的全身ダイナミック動作として, 飛来する複数の物体から守るため, ある物体を打撃して軌道を変化させる, 飛来する他の物体は掴むなど, 複数の動作を連続的に行うことも考えられる。本研究において, 跳躍打撃動作を実現することで, これらを実現する第一歩となると考えられる。

1.2 目的と方法

本研究では, 不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作を行うことで危機回避等を達成可能なヒューマノイドロボットの実現に向けて, その代表例として, 事前に確定していない軌道とタイミングで飛来するボールに即応し, 跳躍し空中で打撃する腕付二脚ロボットの構成法を扱っている。このような動作を行うロボットの身体設計論, 動作生成法, および予備動作生成法を提案し, 各手法を跳躍打撃動作において評価する。この跳躍打撃動作は, 加速度的な移動, 位置と速度を要求する上肢運動, 状況の多様性, 時間的制約とタイミングの要求など, 上述した動作の特徴を顕著に備えている。

1.3 論文構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では, 本研究の背景と目的について述べた。2章では, 跳躍打撃動作において行う運動と情報処理について論じる。加えて, ロボットの身体設計法, 動作生成法, および運動調節法に関する従来研究を整理し, 本研究で取り組む課題を論じている。3章では, 即応的でダイナミックな全身動作を行う空気圧ロボットの駆動系設計

法について述べる。4章では、空気圧駆動系の特性を考慮した動作学習，生成法および運動調節法を提案する。5章では，4章で提案した動作学習・生成手法および運動調節法の拡張と腕付脚式ロボットへの適用について論じる。6章では，実機での跳躍打撃動作実験を通じて提案する各手法の有用性を実験的に示す。7章では，得られた知見を総括し，本研究の意義と展望について論じる。

第2章

即応的全身ダイナミック動作に関連する知能ロボット技術

本章ではまず，即応的全身ダイナミック動作の特徴，およびその特徴を顕著に備え，本研究において運動タスクとして扱う跳躍打撃動作について述べる．次に，即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの身体設計について考察する．続いて，即応的全身ダイナミック動作において要求される機能およびロボットの身体特性を踏まえ，その動作生成法を検討する．最後に，同様にそれらを踏まえて即応的全身ダイナミック動作の調節法について考察する．

2.1 ロボットによる跳躍打撃動作の概要

不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作の代表例として本研究で扱う跳躍打撃動作の詳細として，ロボットが行う知覚，認識，予測，判断，運動選択，および実行における誤差補償について述べる．ロボットは常に何らかの与えられたタスクを有している．このタスクとして，物体の運搬，人間とのコミュニケーション，環境情報の収集などが挙げられる．ロボットはそれらのタスクを遂行するための副次的なタスクを同時に遂行する．このサブタスクとして，環境中の物体の識別，自己の位置，姿勢，自己状態の推定，消費エネルギーの状態，周囲の人間の感情や意図の推定などが挙げられる．ここで，ロボットはどこにどんな物体があるか [33]，どんな運動をしているか [57, 99]などを知覚，判断する．加えて，ロボットは，状況変化発生の有

無，すなわち何か状況変化が生じるかどうかの予測，および状況変化内容，すなわち何がどう変化するかを予測を行う．次に，生じる変化の価値，すなわち予測した変化が危険かどうかの判断，および行為の価値判断を行う．例えば，自身に飛行物体が接近していることを知覚し，物体と自身との衝突を予期し，その衝突が危険だと判断した場合に，物体と自身の価値を比較し，飛来物体の破壊が許容されるか，軌道を変化させた場合に生じる可能性のある人間や他の物体と飛来物体との衝突は許容されるかなどを判断する．ここで，危険の認識，危機的な状況下での判断には，倫理的な判断，価値判断の問題を含む．例えば，瓦礫等の物体が飛来したことを認識し，その物体と人間との衝突によって人間が傷つくことが予想される場合，物体を把持すべきか，打撃すべきか，二人以上の人間が危険に晒されている場合，誰を優先すべきか，人間の保護に対してロボット自身の身体を保護をどの程度優先すべきか，壊れやすい物体が危機に陥った場合，ロボット自身の保護とその物体の保護のどちらを優先すべきか，などである．これらの価値判断の妥当性については社会的，倫理的な課題 [28] を含むため，他の研究に譲る．さらに，回避する，掴む，打撃する，衝突するなどの運動を価値判断に基づいて選択する．跳躍打撃動作の場合には，片腕での打撃，両腕での打撃，脚での打撃，頭での打撃，前方や横に跳躍して腕を振り上げる打撃，垂直に跳躍して頭上で腕を振り下げる打撃，数歩の走行，跳躍に続く打撃，反転して後方に跳躍する打撃などの様々な動作から，ロボットが状況に適したものを選択し，実行する．最後に，選択した運動を実行する．運動中には，運動目標を達成するために，事前に計画した運動からの誤差を補償する．打撃後は，人間，環境，および自身の損害が最も小さい動作を選択する．ここで，他の目的が達成された上で受け身動作を行い [153, 31, 77]，最大限に自身の身体を保護する．以上の跳躍打撃動作の詳細を踏まえ，以下では要素ごとに関連研究を概観し，即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの実現に向けて取り組むべき課題を明らかにする．

2.2 多様なダイナミック動作を行うロボットの身体設計

ロボットの身体設計に関する従来研究を概観し，即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの身体設計について検討する．

2.2.1 軽量高出力なロボット駆動系

即応的全身ダイナミック運動においてロボットは、状況に応じた加速運動を行う。このため、この運動を行うロボットには、軽量で高出力の身体が必要である。ロボットの身体設計を決定づける要素としてアクチュエータが挙げられる [185]。ロボットに用いられるアクチュエータとして主に、電磁モータ、油圧アクチュエータ、空気圧アクチュエータが挙げられる。その他にも、高分子アクチュエータ [154] や Shape Memory Alloy (SMA) [44] などのアクチュエータも開発され、小型の跳躍ロボットなどに用いられているが [95, 166]、連続的に制御でき、数 kg から数十 kg のロボット身体を加速できるだけの出力を備えたものは、これまでに開発されていない。このため、即応的全身ダイナミック動作を行うロボットに対する電磁モータ、油圧アクチュエータ、空気圧アクチュエータそれぞれの適用可能性と、適用方法、取り組むべき課題について以下に検討する。

電磁モータは他のアクチュエータと比較して応答性が高く、制御性が高い。このため、短い周期で制御を行い、計画した軌道を追従することで所望の振る舞いを生み出すことが出来る。電磁モータは産業用ロボットなどに最も広く用いられている。電磁モータの出力を高める方法として、モータを大型化する、使用する電流を増やす、減速機を用いるなどの方法がある。出力を増加する場合には、これらの方法を複数組み合わせる用いられる場合が多く、大きな自重を扱う必要のあるヒト型ロボットには、大型の電磁モータが関節部分に配置されることが多い [114]。高速に走行する四脚ロボットの駆動系として、脚を軽量化し、脚の運動速度を高めるために、大型の電磁モータを体幹付近に配置し、リンク機構やワイヤで膝を駆動する提案もなされている [125]。電磁モータで高出力を発揮する時に発生する熱を水冷式の冷却システムによって冷却することで、高出力を実現したという報告もある [47]。

油圧アクチュエータは油に高い圧力を与えられるため、大きな出力が生成でき、駆動部分を小型化できるなどの利点がある。このため一般的には、車のブレーキシステムや重機の駆動などで用いられる。ロボットとしては、限定された空間に多くの駆動部位を実装する必要のあるロボットハンド [51]、脚式ロボット [121]、COMAN [141]、Petman [82] などのヒューマノイドロボットに用いられている。一般に油圧系の問題点としてシステム全体が大型化、大重量化する傾向にあることが挙げられる。

空気圧アクチュエータは、コンプレッサで圧縮された圧縮空気を利用して駆動力を生み出すアクチュエータである。圧縮空気の弾性が生むバックドライバビリティを備えるのが特徴で、食品の加工を行うロボットなどに利用されている [11]。空気のもつバックドライバビリティはダイナミック動作に有効であり、Raibert の連続跳躍ロボットにも用いられた [112]。空気圧アクチュエータには様々な種類がある [87, 15]。代表的なアクチュエータとして、空気圧シリンダ [5, 13] および空気圧人工筋 [52, 17, 120] が挙げられる。空気圧シリンダは両チャンバの差圧からピストンに与えられる推力によって駆動される [176]。同一差圧でピストン位置に関わらず一定の力で発生するため、空気圧人工筋に比べて制御が容易である。ロッドやリンクに固定するための末端部が大型化、大重量する傾向にあり、一般に空気圧人工筋よりも重量が大きい。空気圧シリンダを備えたロボットアームの制御方法は古くから研究されている [13]。災害現場での高い踏破性能を有するロボットとして、車輪型と跳躍用のシリンダを備えたロボットも開発された [142]。高い跳躍性能を備え、不整地を踏破する四脚ロボットのために、空気圧シリンダを備えた駆動系の構成方法が提案された [55]。人間の近くで運用する上で、空気圧シリンダの備えるバックドライバビリティは有利であるため、人間と力学的な相互作用を行うロボット [71, 42]、人間と安全に接触を行うロボット [98, 148]、幼児型ロボット [45]、ジェミノイド [9] などに搭載されている。

空気圧人工筋は、軽量小型、高出力、安価なアクチュエータである。ゴムなどで遮蔽された内部の空間が圧縮空気の流入によって膨張する力を、外部の構造が軸方向に収縮する力に変化することで駆動する [54]。代表的な空気圧人工筋肉として、McKibben 型 [17]、直動型等 [19] などが挙げられる。これらは、高いバックドライバビリティ、小型、柔軟、軽量などの利点があり、リハビリを行う外骨格ロボット、人間と接触するロボット [128]、準受動歩行ロボット [80] などに用いられる [5]。空気圧人工筋は小型かつ柔軟であるため、設計の自由度が高く、動物の筋骨格系を模倣した身体構造を備えたロボットに用いられた。筋骨格系を模倣した身体を備えたロボットによって立位姿勢保持 [96]、歩行 [80]、跳躍 [85, 91, 90]、連続跳躍 [37]、走行 [86]、物体把持 [136]、ドア開け [43]、棒高跳び [88] などが実現され、構成論的手法を通じたダイナミックな運動における筋骨格系の機能解明に寄与している [160]。

これらの研究では生体に近い構造を試作し、発見するという方法論を取っている。一方で必要な要求機能から空気圧人工筋をロボット身体に実装した報告もある。走行

における下腿の形態的機能を炭素繊維を材料とする陸上競技用の義足に実装し、走行するロボットが開発された [86]. ダイナミックな運動をより効率的に行うことを目指し、空気圧人工筋と粘性要素を組み合わせたブレーキ機構の導入も行われている [180]. 空気圧ロボットは、搭載されたタンクでの駆動も含めて、外部のコンプレッサからの圧縮空気供給が必要である. コンプレッサ搭載の空気圧ロボットの研究も進められており [72], 将来的には内蔵コンプレッサによる自律駆動が期待される. 空気圧人工筋のストロークはシリンダと比較して小さい. 加えて、最もよく用いられる **McKibben** 型人工筋にはヒステリシスがあり、長さに応じて非線形な長さ-力関係があるため、制御が困難である. しかし、跳躍打撃動作で要求される十分大きい加速度の短時間での生成、同動作で生じる可能性の高い環境との予期せぬ接触などに対して空気圧アクチュエータのもつ軽量高出力、およびバックドライバビリティなどの特徴は有用であると考えられる.

即応ダイナミック動作で要求される瞬間的な大加速度の生成、同動作で生じる可能性の高い環境との予期せぬ接触などに対して、駆動系にバネなどの弾性要素を組み込むという方法は有効であると考えられる. 弾性要素を活用することで、エネルギーを弾性体に蓄積し、アクチュエータが瞬間的に発生できる以上の出力を生成できる. 弾性要素へのエネルギー蓄積は小型の跳躍ロボットなどに用いられることが多く [60], 小型軽量なロボットで自身の身体以上の高さの跳躍 [60], 跳躍からの空中回転動作 [81] などが実現された. ダイナミック運動を可能にするアクチュエータとして、電磁モータと弾性体を直列化してパフォーマンスを高める **Series Elastic Actuator (SEA)** [108] が提案された. そのロボット応用 [144, 40], 制御方法 [109, 59] などについて現在にも盛んに研究されている. さらに、板バネへのエネルギー蓄積と解放によって瞬間的な大出力、大加速度を発生する様々な機構が提案された [164, 170, 162, 186]. 弾性体の搭載には、弾性体のない身体よりも制御性が困難になる、部品点数が増加するなどの課題がある. このため、本研究では弾性体を別途駆動系に組み込まない単純な構成を採用した.

両側へ駆動する関節の片側への回転、直動力を発生させるために弾性体を利用される場合がある [85]. これには、アクチュエータ数を削減して軽量化できる、部品点数を削減できるなどの利点がある. 一方、弾性体で駆動する側の運動を制御することが、この機構を採用しない場合よりも困難になる. そのため、本研究では弾性体を駆動系に組み込まない単純な構成を採用した.

機械的に複数関節を協調させるという方法もある。これには、リンク機構を用いて機構的自由度を削減する方法 [102], ワイヤ駆動によって複数関節にトルクを与える方法 [115], 弾性要素で複数関節を接続する方法 [41], 空気圧人工筋の二関節筋を搭載する方法 [97], およびこれらの組み合わせなど方法がある。機械的に複数関節協調には、アクチュエータ数の削減, 軽量化, 明示的な制御なしに所望の振る舞いを設計可能などの利点がある。一方で, 遂行可能な運動が限定的になる場合がある。これがない場合よりも制御が困難になるなどの課題もあるため, 本研究では, 機械的複数関節協調のない単純な機構を採用した。

2.2.2 ダイナミック動作を行う空気圧ロボットの設計

これまでに, Raibert の連続跳躍ロボット [111], シリンダ搭載垂直跳躍ロボット [142] などが開発され, 単純な身体 of ロボットが行うダイナミック動作における空気圧アクチュエータの優位性が示された。回転関節, 多関節の空気圧ロボットの設計, 制御には課題があり, 現在でも多くの研究が行われている [126, 70, 110]。空気圧アクチュエータに内在する空気の粘弾性を活用するために, ダイナミック動作中の剛性調節について盛んに取り組まれている [126]。所望の各方向への四肢末端からの力から多関節に備わる複数人工筋の配置を決定する方法として, Maximum Output Force profile (MOF) が提案された [84]。ここでは, 姿勢および筋の最大張力が考慮されたが, 現実にはアクチュエータの内圧を目標値に追従する上での遅れが存在するため, この遅れを考慮した設計論へと拡大する必要がある。空気圧人工筋を有するロボット設計には, 構造体に炭素繊維強化プラスチック (carbon-fiber-reinforced plastic, CFRP) を用いることが一般的であり, 空気チューブや信号線, 計算機等は, バッテリー, 電磁バルブ, 空気タンクなどと比較して軽量である。電磁バルブは空気圧アクチュエータへの圧縮空気の流入を制御するために用いられる。空気流入のオリフィスは, ダイナミック動作の性能を最大化するためにロボットを軽量化していく際の律速要素である。このため, アクチュエータの配管などが研究されている [155]。急加速運動では, 重量だけでなく, アクチュエータが最大限の力を短時間で発揮するために, 圧縮空気の流入速度を考慮する必要がある。空気圧ロボットの空気配管に関して, 所与の空気源から加速度を最大化する空送系およびアクチュエータの設計法をこれまでに例がない。このため, 本研究ではこの問題に取り組む。

本節で検討した即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの身体設計についてまとめる。電磁モータや油圧アクチュエータにもダイナミック動作を行う上での利点はある。しかし本研究では、軽量性、安全性、バックドライバビリティなどの利点を重視し、空気圧アクチュエータを採用する。ダイナミック動作の性能を向上させる上で、機械的多関節間協調、弾性要素の利用は有効である。部品点数の削減、制御性の向上などの理由から本研究では単純な構成を採用する。ダイナミック動作に対する空気圧アクチュエータの有用性は示されてきた。多関節ロボットへの応用は課題もあり、即応的全身ダイナミック動作を行うロボットには、所与の空気圧資源を最大限に活用して加速度を最大化する設計方法が必要であるため、本研究ではこの課題に取り組む。

2.3 空気圧ロボットによる過渡的な加速動作の生成法

本節では、まず、典型的なロボットの制御戦略について確認する。次に、従来のダイナミック動作の制御・学習の手法について説明する。続いて、予測に基づくロボットの行動計画について確認する。最後に後続するダイナミック動作の性能を決定づける身構えについて述べる。

2.3.1 ロボット全身運動の計画と制御

二脚ロボットの全身運動のほとんどは、Zero Moment Point (ZMP) [147] を拘束条件として運動が計画、制御されることで実現されてきた。この手法では、ZMP が支持基底面内に内包されるように計画、保持することで、転倒を防ぎ、立位安定を動的に保持できる。一脚支持における ZMP を計画し、空中期との境界条件を設定して解くことで ZMP 規範による走行も実現されている [134]。例外として、接触情報を用いた動的起き上がり動作 [63]、リミットサイクルを規範とする歩行 [36, 116]、および走行 [117]、ルールベースでの走行 [53] などが挙げられるが、ZMP 規範で生成された運動と同等の多様な運動を生成するには至っていない。

ロボットの全身運動として、床にある物体を把持するためには腰を曲げ、物体へと手を伸ばす立位でのリーチング、全身リーチングの軌道生成と制御が古くから取り組まれている [93]。これらは、両脚支持か片脚支持で支持状態が変わらないか、両脚

支持から片脚支持へと支持状態が変わるかのどちらかに限定されている。上肢運動で目標を達成し、支持状態の切り替えを含む動作として、踏み出して行う全身リーチング動作がある [151]。片脚支持での全身リーチングや、障害物を回避しながらの全身リーチング [124] も実現された。環境との力学的相互作用を含む全身動作、支持状態の切り替えを含み、上肢運動で目標を達成する全身動作の計画、制御方法が提案され、ドアの通過 [6]、重量物を運びながらの歩行 [35]、重量物を押しながらの歩行 [137] などを実現されている。他の支持状態の切り替えを含む上肢運動には、脚式ロボットによる投擲運動が挙げられる [1]。ここでは、支持状態を安定に保つ周期運動を行い、特定の運動パラメタに着目して腕運動を最適化することで、重量物の投擲が行われた。

全身の各リンク、関節摩擦、慣性などの身体パラメタが精度よくモデル化されており、応答性、追従性に優れたアクチュエータを備え、軌道における変化量が収束性に対して十分小さく、予測した環境変化が生じて行動を開始するまでの十分短い間に、関節可動域や自己干渉などの幾何的拘束、最大トルクなどの力学的拘束下で運動計画が完了するならば、終端状態において支持状態である範囲においては、この手法を拡張して即応的全身ダイナミック動作を行うことが可能である。現在、ヒト型ロボット [140] や多関節身体 [145] のパラメタ推定、全身運動の高速な計算など [132, 106] について盛んに研究されており、今後の計算機発達を見込めば、将来いずれかの時点で上記の範囲での問題は解決すると考えられる。しかし、打撃などのダイナミック動作タスクは、単純な時間的最小化や制限時間内での収束などの問題としてだけでは扱えず、運動タスクごとに他の最適化規範を用いるか、経験から動作性能を高める戦略を自律的に学習する必要がある。

加えて、空中期での運動も課題となる。空中でロボットは非ホロノミックな系 [178, 177] である。非ホロノミック系の制御方法は、宇宙ロボットを中心に多くの研究がなされてきた [143, 152, 187, 179]。これらの知見を利用することで、特定位置、姿勢に効果器の状態を収束させることは可能である。一方で打撃のように所望のタイミングと速度を要求する運動タスクでは、反復計算によって所望の状態に収束する軌道を探ることが必要になる。さらに、支持期から空中期への切り替えが起こる時刻の境界条件の最適化にも繰り返し計算が必要となり、空中での全身姿勢まで考慮して実時間で計算を終え、解を得ることは困難であり、解が発見される保証もない。このため、本研究では学習によって跳躍打撃動作を行う。

2.3.2 ダイナミック動作の制御と学習

連続跳躍 [111], 走行 [134], ジャグリング [119] など周期的なダイナミック動作に関する多くの研究がある。そこでは, リミットサイクルアトラクタや, ZMP などの一定の規範のもとで, その規範に従うように運動させることで周期的な運動が破綻することなく継続する。一方でダイナミックな過渡的な運動は, 高剛性のロボット身体を短い周期で制御することで実現されてきた。卓球における多様なスイングを人間の教示から学習し [74], それを軌道計画に用いる方法が提案され, 人間とのラリーが実現された [73]。学習は軌道計画に用いられ, 軌道の追従は Barret Arm の軽量性と高周期の制御によって運動が生成された。

高速な視覚情報処理機構に基づく短周期のフィードバック制御 [46] によって, 多様なダイナミック動作が実現された。これらのダイナミック動作は物体の加速度を操作するダイナミックマニピュレーション [184, 68] と呼ばれ, 捕球 [79], 投球 [123], 持ち替え [32], 布の折りたたみ [161], 紐の結び [149], 打撃 [122], 走行 [138] などが, 高速視覚情報処理 [169] を基盤として実現されてきた。

一方, 高周期の制御を行わず, 制御を行わず, 柔軟な身体構造を活用することで, ダイナミック動作を行う取り組みも行われている。動物の筋骨格系身体構造を規範とした身体設計を行い, 二関節筋の機能を活用することで外乱にロバストな跳躍が実現されている [85]。同様の空気圧ロボットに利用可能な, 一定指令とその切替時刻の決定法が提案された [83]。この手法によって空気圧ロボットの垂直跳躍と着地が実現されたが, 状況に応じた運動を生成する方法は分かっていない。人間が直接教示することで空気圧ロボットに立ち上がり動作を学習する手法 [42] や, 筋骨格ロボットに軌道を再現させる方法も提案された [43]。しかし, 状況に応じて学習した運動を選択する方法は分かっていない。

本節で述べた空気圧ロボットのダイナミック動作生成についてまとめる。これまで全身運動は, 計画と制御に問題を分割し, 計画した軌道に追従する可能であることを前提として実現されてきた。即応的全身ダイナミック運動では, 離陸による系の切り替えや, 腕の速度, タイミングなどが要求されるため計画が困難である。加えて, 空気圧ロボットを用いた場合には計画した軌道への高速な追従は困難であり, 学習を用いる方法が有効であると考えられる。従来の空気圧ロボットの学習は, 単一の運動を

習得，あるいは最適化するものに限られている．このため，空気圧ロボットが学習を通じて状況に応じた運動を選択，実行，調節する方法論が必要である．よって，本研究ではこの課題に取り組んだ．

2.3.3 予測に基づくロボットの行動計画

前述したように，動作開始までの予測と準備が即応的全身ダイナミック動作に影響を与えると考えられる．このため，即応的全身ダイナミック動作が行われる状況について検討する．動的に変化する実世界において，ロボットの行動は環境の動的変化に制約される．具体的には，移動能力と物体操作能力を備えたロボットが人間環境で運用される時，落下する花瓶を着地までに掴み，倒れる老人を支えるような即応的全身ダイナミック動作が要求される．これは，環境の動的変化に対して，実時間で行動し，対応する問題である．同様の問題は，自動運転車やサービスロボットなどの都市で移動する車輪型移動体や，工場で人間と協調するロボットなどに対して既に取り組みされている．人間を含む環境を移動する車輪型移動体にとって，人間などの障害物の運動予測とそれに基づく計画は1つの主要な課題である [26, 103]．車輪型移動体の動作計画については古くから多くの研究が行われており，動作計画として移動時間の最小化（時間最適化）の問題が解かれている [127]．これによって，移動能力を最大限に発揮した場合に移動可能な領域が計算できる [173]．工場などで人間と共同作業を行う（協働する）ロボットには人間との接触が生じうるため，それが生じないように人間に自らの動きを予測させる [23]，人間との接触を回避し，接触した場合に停止する [34, 20]，接触が生じた際には人間に力を与えないように外力に追従する [65] などの戦略と実装について研究されてきた．

動的に変化する環境に対して，自身の運動を停止する，外乱に応じながら運動を継続するなどの他に，即応的全身ダイナミック動作のように，望ましい状態になるよう変化に応じて積極的に働きかけることも考えられる．このような積極的な働きかけを行う運動の従来研究として，飛来物の把持，捕球，打撃が挙げられる．飛来物の軌道と姿勢の学習，予測方法 [56] や，飛来するボールの認識，軌道予測法 [10]，それらに基づくボールや飛来物の把持が実現されている [57, 8]．卓球などでボールを打撃するロボットの研究は数多く行われ，軌道の予測に関して多くの知見が蓄積している [69, 4]．しかし，卓球専用の身体を備えたものが多く，脚式ロボットによる卓球の打

撃動作はほとんどない。ヒト型ロボットの卓球動作として、打撃動作で生じる外乱を保証する方法が提案された [133]。しかし、同一支持状態で打撃不能な軌道に対して、移動して打撃することは考慮されていない。脚での移動を含む即応動作に関連する研究として、リミットサイクルを規範として移動する脚式移動体が制限時間内での移動、移動効率の最適化など、異なる要請に対して移動する方法を解析した研究が挙げられる [39]。しかし、この研究では単純モデルを用いており、最大関節トルクなど多関節の脚式ロボットが即座に運動する上での制約は考慮されていない。

以上のように、脚式ロボットが状況変化を予測し、予測内容に基づいて運動する方法論については、これまで提案されていない。一方、予測に基づいて即応的全身ダイナミック動作を行う人間の振る舞いに関しては多くの知見があり、そのようなロボットを構成する上で重要な示唆を与えることが期待される。これら人間に関する知見について次に述べる。

2.3.4 後続するダイナミック動作の性能を決定づける身構え

予備動作が人間が行う即応的全身ダイナミック動作に与える効果について、スポーツバイオメカニクス分野を中心に多くの研究が行われている。陸上競技におけるスタート時の姿勢が走行パフォーマンス影響を与えること [29, 129, 66, 24]、沈み込みの深さによって跳躍高さが変化すること [21]、腰の高さによってバレーボール選手の短距離移動速度が変化すること [49]、剣道の構えにおける足の姿勢が打突動作の筋活動に与える影響 [157]、下肢筋の状態に応じて選択サイドステップ動作速度が変化すること [30]、Basic Dynamic Posture（動的的基本姿勢）[38] と呼ばれる前傾した姿勢を取った場合に眼球運動の反応速度が短縮すること [159] などが報告されている。以上のような報告を踏まえ、ロボットにおいても、予測に基づいて適切に予備的動作を行うことでパフォーマンスが向上すると期待される。しかし、前述の知見は現象の事後的な説明にとどまっており、予備動作や初期姿勢がパフォーマンスを変化させる原理は明らかになっていないため、ロボットの情報処理と運動の原理を踏まえて独自に理論を構築する必要がある。

人間と同様に、ヒューマノイドロボットが所与の出発姿勢を選択することで全身リーチング計画速度が増すという報告もされている [158]。加えて、ZMP 予見制御によって既知のタイミング、力積の外乱に対して姿勢制御を行う身構え方法が提案され

た [165]. しかし、次に行う運動が完全に既知でない場合に、予備的な状態を選択する方法は明らかになっていない。

予備動作を行って即応的全身ダイナミック動作の性能を高める戦略をロボット構成法として応用するためには、予備動作、予備動作に続くダイナミック動作、ダイナミック動作における目標状態、目標状態に対する予測内容、ロボットの身体的制約、環境的制約、およびタスクの制約などを数理的なモデルで表現することが必要である。このような研究はこれまでにないため、本研究ではこれらに向けた運動の表現と利用方法に取り組む。

2.4 空気圧ロボットによる過渡的な加速運動の調節法

即応的全身ダイナミック動作においてロボットは、実行中に生じる運動誤差、計測誤差、予測誤差、モデル化誤差、学習誤差などの誤差を過渡的な運動中に調節する必要がある。このため本節では、ロボットの過渡的な加速運動を調節する方法について検討する。

運動中に生じた誤差を修正し、目標の状態に遷移させる制御は、ロボットの運動調節に広く用いられてきた。目標の軌道に追従するシステムでは、状況に応じた軌道の生成と、生成された軌道の追従を別の問題として扱える。実際に、打撃 [122, 74] などのダイナミック動作においても同様の戦略が採用された。

一方、空気圧ロボットに高速な動作を行わせる場合、計画した軌道を厳密に追従することが難しい。これは、電磁モータや油圧アクチュエータと比較して、空気圧系の応答性が低いためである。軌道計画と運動制御に問題を分割することが困難であるため、本研究では動作生成および行動生成と同様に機械学習的方法を採用する。すなわち過去の運動経験に基づいて、動作中の調節を行う。空気圧ロボットの過渡的ダイナミック動作の学習に用いられた Sparse Coding of Activation (SCA) [83] の考えに基づき、区分一定の運動指令とその切り替えタイミングによって運動を表現する。

第3章

即応性を備えた空気圧ロボットの設計法

本章では，即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの身体設計について述べる．まず，そのようなロボットの駆動系の要求仕様を確認する．次に，この仕様に従って実装した空気圧駆動系について説明する．最後に，開発した駆動系を搭載したロボットが仕様を満たすことを確認する．

3.1 跳躍打撃動作に要求される設計仕様の検討

跳躍打撃動作を行うロボットに必要な身体性能について調べるため，平面上での跳躍打撃動作をシミュレーションした．シミュレーションでは，ボールの軌道およびロボットの運動を網羅的に探索し，特定の打撃結果を生み出すパラメータを収集し，(1) 想定した跳躍打撃におけるボール軌道の特徴，(2) 広範なボール軌道に対する跳躍打撃動作に必要な運動特徴，および(3) それに必要な身体的特徴について調べた．

跳躍打撃動作において，ロボットが満たすべき打撃可能領域として，足位置から自身の全長以下の距離に落下するボールを打撃すべきだと設定した．これは，人間の行う跳躍打撃の観察によって決定した．

3.1.1 実験条件

シミュレーションの実験条件について述べる。前方への跳躍打撃動作を想定して矢状面におけるロボットの運動をシミュレーションした。シミュレーションに用いたロボットのモデル (Fig.3.1, Table3.1) は、前腕、上腕、体幹、上腿、下腿、および足の6リンクと肘、肩、腰、膝、および足首の5関節を備える。質量の設定は、現存の空気圧ロボットを参考にして決定した。この自由度構成は、実際の二脚式ロボットと比較して単純であるが、矢状面における全身の振る舞いを十分に表現できると判断して採用した。網羅的に運動を探索するため、モデル規範型の軌道生成を行い、計画したロボットの軌道に理想的に追従した時の運動を収集した。実際には、計画した軌道とは異なる軌道を生じると考えられるが、その差は十分小さく、運動の集合が有する全体的な傾向は一致すると判断して、この方法を採用した。重心軌道、打撃時刻、打撃時の上腕姿勢を与えて打撃動作を生成した。生成した動作の中から、関節角度限界の超過、トルク上限の超過、踵の離陸、離陸後の足の再着地、および足以外の身体部位の着地が生じたものを失敗動作として除外した。接地期間において、爪先の位置 $[p_{0x}, p_{0z}]$ は移動せず、ロボットは爪先回りに回転すると仮定した。空気抵抗、関節摩擦および床と足底の摩擦は無視した。計算には MATLAB2013a を用いた。物理的制約、タスクの制約、身体的制約を満たすように各時刻の関節角加速度を求め、タイムステップ 1ms で加速度に基づく速度と角度、位置の微小変化を順動力学計算した。初期姿勢のパラメータは Table3.2 に示したものをを用いた。

Table3.2 Parameters of initial posture.

p_{0x} [m]	p_{0z} [m]	θ_1 [rad]	θ_2 [rad]	θ_3 [rad]	θ_4 [rad]	θ_5 [rad]	θ_6 [rad]
0	0	3.1416	2.2253	4.7124	1.5708	2.8798	4.3197

3.1.2 身体モデルに基づく跳躍打撃動作の軌道生成

跳躍打撃動作に必要な身体性能を明らかにするためには、多様なボールの軌道に対応する跳躍打撃動作を効率的かつ網羅的に試す必要がある。このため、跳躍打撃動作を表す主要な運動特徴を網羅的に変化させ、その特徴を満たす運動を生成した。この

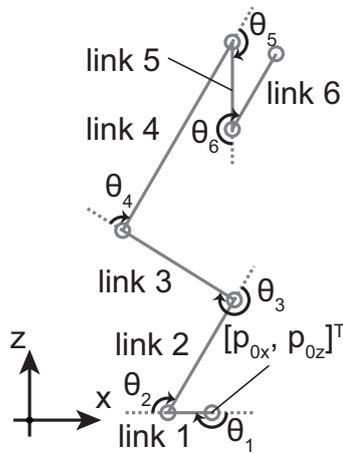


Fig.3.1 Humanoid model.

Table3.1 Model link parameters of a model in the sagittal plane.

Link	Length [m]	Mass [kg]	Inertia [kgm ²]
1	0.15	0.5	0.0010
2	0.30	1.0	0.0077
3	0.30	2.0	0.0154
4	0.50	10.0	0.2104
5	0.30	1.0	0.0077
6	0.30	0.5	0.0039

ような跳躍打撃動作の生成方法について以下に説明する。具体的には、跳躍打撃動作の特徴、および特徴の実装方法について説明する。

跳躍打撃動作の特徴

跳躍打撃動作は、静的に安定な支持状態、動的な支持状態、および空中浮遊状態の3状態を備える。このため、状態ごとに制御方法を切り替えることを想定して跳躍打撃動作を、(i) 重心の水平位置が支持基底面の外へ出る重心スライド局面、(ii) 重心が速度を得て離陸する跳躍局面、(iii) 空中で腕を振ってボールを打撃する打撃局面の3局面に分割した。本研究で扱う跳躍打撃動作では前方への跳躍を行う。このため、従来の垂直跳躍、連続跳躍、歩行、走行などの二脚式ロボットの移動運動には見られない特徴を備えた動作を生成した。これらの特徴は具体的には、前傾動作、爪先関節周りの回転、および重心周りの回転運動量である。以下にこれらの詳細を述べる。

● 前傾による加速

本研究における跳躍打撃動作生成では、短時間で大きな速度を得るために全身が前方に倒れこむ時の重心加速度を利用する。二脚式ロボットの歩行における重心軌道生成では多くの場合、重心高さの変化、すなわち鉛直方向の重心位置の変動がないように制約する。この制約によって、運動の表現が単純になり、周期的な運動を安定化させ、数学的な取り扱いが容易になる。一方で、本研究

で扱う跳躍は過渡的な動作であり、この制約によって跳躍パターンが限定されるおそれがある。このため本研究ではこの制約を加えず、鉛直方向の重心位置は自由に変動させる。ほとんどの場合、二脚式ロボットの全身動作では、床反力中心点 (center of pressure, COP) が支持基底面内に収まるように重心軌道が計画、制御される。これによって、ロボットが立位姿勢を安定的に維持し、転倒を避けることが可能である。一方、網羅的に跳躍動作を探索するためには、跳躍が失敗するほど姿勢平衡を崩す直前のパラメタまで探索するのが望ましい。これは実際には、跳躍が失敗するパラメタまで含んで探索することで初めて可能になる。このため本研究では、足底支持基底面の境界付近に床反力中心点が存在することを許容してロボットを前傾させ、跳躍において重力を活用した前方への加速度を得る。

- 爪先部分での接地

一般的に二脚式ロボットは、平面状の足底を備え、足底全体が同時に離陸、着地するように移動する。これによって、足底の縁で支持される不安定な姿勢をとらず、常に支持多角形を広く保ち、安定性を高められる。一方で、爪先関節を用いることで脚式ロボットの跳躍性能が向上することが知られている [135]。この理由として、跳躍に用いる関節が増加する、作用点までのモーメントアームが小さい爪先関節は大きなトルクを発生できる、足首の可動域を最大限に活用できるなどの理由が考えられる。このため本研究でも足首可動域の最大限活用を期待して、足関節の周縁部で接地を許容する。

- 重心回りの角運動量の利用

多くのロボットの全身運動生成では、重心周りの角運動量を 0 に設定する。これによって、所望の振る舞いに関係しない系の状態量の変化量を低減でき、予期せぬ外乱によって制御不能な領域へ陥る可能性を低くできると考えられる。一方で、跳躍打撃動作では跳躍可能な範囲以上の継続的な姿勢安定化は不必要であり、跳躍打撃動作を網羅的に探索するためにも、系が到達可能な状態を広く取った方が良い、このため本研究では、重心周りの角運動量が 0 以外の動作も採用した。

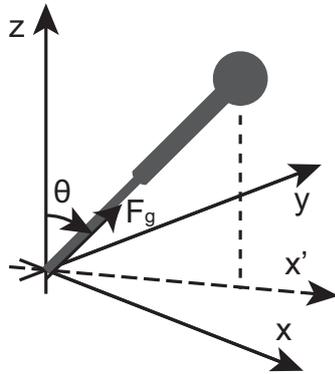


Fig.3.2 Inverted pendulum model.

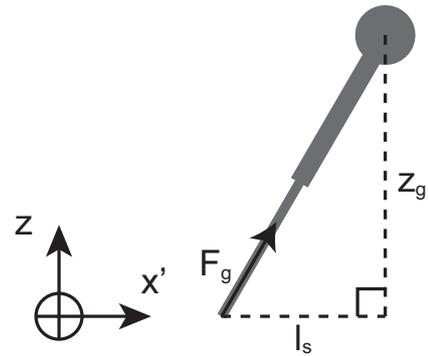


Fig.3.3 Inverted pendulum model at half time of the jumping.

重心軌道の生成法

重心軌道生成には、3次元倒立振り子モデル (3D Inverted Pendulum model, 3D-IPM) を用いた。モデルを Fig.3.2 に示す。 \mathbf{F}_g は床からロボットが受ける力の合力、 θ は倒立振り子と z 軸のなす角である。重心の加速度を $\ddot{\mathbf{p}}_g$ とすると、重心の運動方程式は以下になる。

$$M\ddot{\mathbf{p}}_g = \mathbf{F}_g + M\mathbf{G} \quad (3.1)$$

ここで $\mathbf{G} (= [0, 0, -g]^T)$ は重心加速度、 M はロボットの全重量、 g は重力定数である。シミュレーションでは、 $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ とした。

床から受ける力の中心位置を \mathbf{p}_c 、床反力の絶対値を $\|\mathbf{F}_g\|$ とすると、 \mathbf{F}_g 、 \mathbf{p}_c 、および \mathbf{p}_g の関係は以下の式で表せる。

$$\mathbf{F}_g = \|\mathbf{F}_g\| \frac{\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_c}{\|\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_c\|}. \quad (3.2)$$

重心スライド局面における重心軌道について述べる。 $p_{g-x'}$ 、 $\dot{p}_{g-x'}$ 、および $\ddot{p}_{g-x'}$ は、重心の位置、速度、加速度のうち、倒立振り子が倒れる方向の水平成分である。重心の位置、速度、加速度の鉛直方向成分は常に 0 である。

次に、これらの変数の決定式について述べる。重心スライド局面の終了時刻を t_s 、 $\omega_s = \pi/t_s$ とし、重心スライド局面における重心の水平方向成分を以下のように決定

した。

$$\ddot{p}_{g-x'}(t) = c_2 \omega_s^2 \sin \omega_s t + c_1 \quad (3.3)$$

$$\dot{p}_{g-x'}(t) = -c_2 \omega_s \cos \omega_s t + c_1 t + c_3 \quad (3.4)$$

$$p_{g-x'}(t) = -c_2 \sin \omega_s t + \frac{1}{2} c_1 t^2 + c_3 t + c_4 \quad (3.5)$$

ここで、 c_i ($i = 1, \dots, 4$) は係数である。これを下記の拘束条件の下で解いた。

$$\ddot{p}_{g-x'}(0) = 0 \quad (3.6)$$

$$\dot{p}_{g-x'}(0) = 0 \quad (3.7)$$

$$\ddot{p}_{x'}(t_s) = 0 \quad (3.8)$$

$$|p_{c-x'}(\frac{t_s}{2}) - p_{g-x'}(\frac{t_s}{2})| = l_s \quad (3.9)$$

ここで、最終行の式が表す $t = t_s/2$ における状態を Fig.3.3 に示した。このとき、下記のように拘束する。

$$\ddot{p}_{x'}(\frac{t_s}{2}) : g = l_s : z_g \quad (3.10)$$

以上の拘束条件から、係数は以下のように決まる。

$$c_1 = 0 \quad (3.11)$$

$$c_2 = \frac{p_{g-x'}(t_s) - p_{g-x'}(0)}{\pi} \quad (3.12)$$

$$c_3 = \frac{\omega_s(p_{g-x'}(t_s) - p_{g-x'}(0))}{\pi} \quad (3.13)$$

$$c_4 = p_{g-x'}(t_s) - \frac{\omega_s t_s (p_{g-x'}(t_s) - p_{g-x'}(0))}{\pi} \quad (3.14)$$

このように決定した重心の位置、速度、および加速度の水平方向成分を Fig.3.3 に示した。図から、重心スライド局面の終端において重心位置はつま先に当たる位置の直上、重心速度成分は正の向き、重心加速度の成分は 0 であることが分かる。

跳躍局面における重心軌道の決定方法について述べる。重心加速度が連続的に変動するように、床反力の絶対値は以下のように決めた。

$$\|F_g(t)\| = \begin{cases} Mg & (t < t_s + t_0) \\ Mg\{A \sin \omega(t - t_0) + 1\} & (t \geq t_s + t_0) \end{cases} \quad (3.15)$$

ここで、 M はロボットの全重量、 g は重力加速度定数、 A は定数である。さらに、 ω は以下の式で定義される角周波数である。

$$\omega = \frac{2\pi}{t_p} \quad (3.16)$$

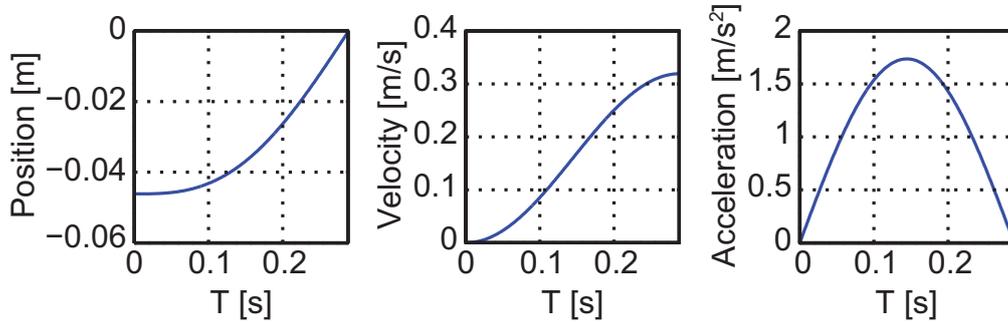


Fig.3.4 Trajectories of center of gravity in sliding phase. Parameters; $l_s = 0.0935$ [m], $p_{g-x'}(0) = -0.0461$ [m], $p_{g-z}(0) = 0.5277$ [m] and $p_{g-x'}(t_s) = 0$ [m].

倒立振子モデルを仮定するため，この床反力の向きは床反力中心点から重心の向きである．重心軌道を決定するパラメタ A , t_p , および t_0 は，床反力のピークを決定する変数，重心が前進する時間，および跳躍局面の床反力の正弦波の周期にそれぞれ対応する．重心の前進が終わってから離陸までに要する時間 t_a は，重心が前進する時間と跳躍の周期によって決定する．具体的には下記の式で表される．

$$t_a = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{1}{A}\right). \quad (3.17)$$

跳躍局面の開始から終了までの時間 t_j は以下である．

$$t_j = t_0 + \frac{1}{2}t_p + t_a \quad (3.18)$$

この床反力の絶対値 $|F_g|$ の時間的な変化，およびパラメタ A , t_p , t_0 による $|F_g|(t)$ の変化を Fig.3.5 に示した．

膝の角度は地面から体幹の位置を決定する．このため，跳躍局面における重心高さの加速度と，膝の角度の角加速度が比例するように，膝の角速度を決定した．

得られた重心軌道から，離陸時において幾何的に得られない重心位置を除外する．具体的には，関節可動域の全区間を与えて姿勢を作り，各姿勢における足底境界面と重心との距離を調べ，この距離の最大値と最小値を用いて，離陸時において幾何的に得られない重心位置を除外した．

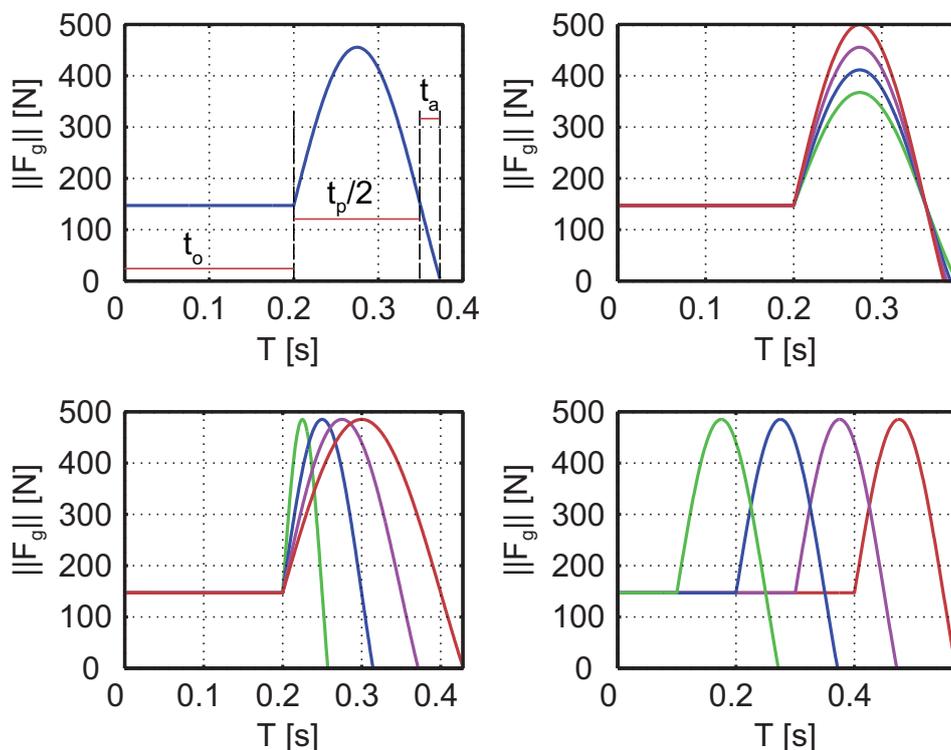


Fig.3.5 Ground reaction force changed by three parameters. The upper left graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 2.1$, $t_p = 0.3$ [s] and $t_o = 0.2$ [s]. The upper right graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 1.5$ (green), 1.8 (blue), 2.1 (violet), 2.4 (red), $T_p = 0.3$ [s] and $t_o = 0.2$ [s]. The bottom left graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 2.3$, $t_p = 0.1$ (green), 0.2 (blue), 0.3 (violet), 0.4 (red) [s] and $t_o = 0.2$ [s]. The bottom right graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 2.3$, $t_p = 0.3$ [s], $t_o = 0.1$ (green), 0.2 (blue), 0.3 (violet), 0.4 (red) [s].

関節加速度の決定法

各関節の加速度の計算方法について述べる。離陸までの時間，世界座標系における肩関節と肘関節の角度が変化しないように決定した。膝の角加速度は以下の式で与えた。

$$\ddot{\theta}_{kne}^{ref} = c_k \ddot{p}_{gz} \quad (3.19)$$

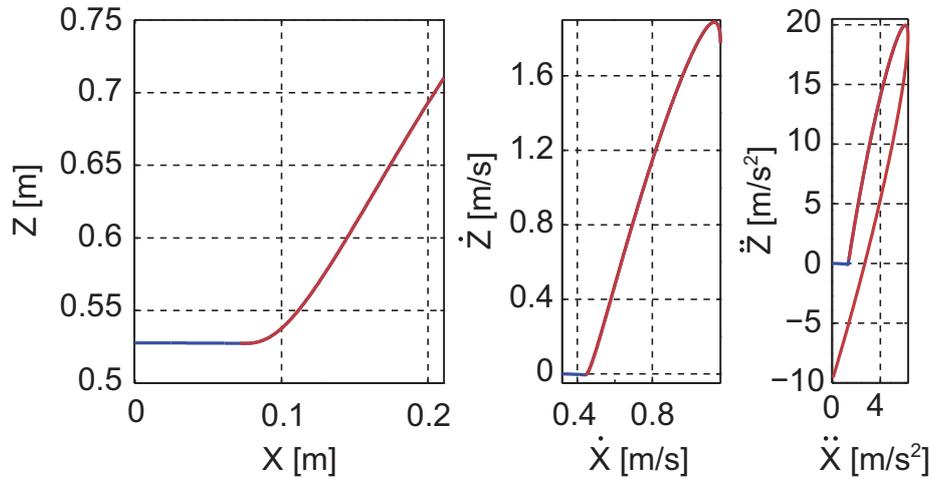


Fig.3.6 Position, velocity and acceleration of center of gravity. Parameters; $A = 2.1$, $t_p = 0.3$ [s] and $t_o = 0.2$ [s].

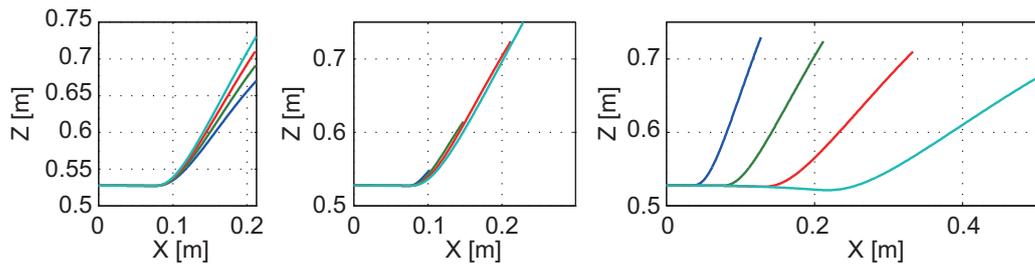


Fig.3.7 Trajectories of center of gravity changed by three parameters. The left graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 1.5$ (green), 1.8 (blue), 2.1 (violet), 2.4 (red), $t_p = 0.3$ [s] and $t_o = 0.2$ [s]. The center graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 2.3$, $t_p = 0.1$ (green), 0.2 (blue), 0.3 (violet), 0.4 (red) [s] and $t_o = 0.2$ [s]. The right graph shows $\|\mathbf{F}_g\|(t)$ with parameters $A = 2.3$, $t_p = 0.3$ [s], $t_o = 0.1$ (green), 0.2 (blue), 0.3 (violet), 0.4 (red) [s].

足首回りの角加速度，足首，股関節の関節角加速度は，重心加速度，重心回りの角加速度を拘束条件として計算した．打撃時刻，打撃時の腕の角度，腕絶対角速度をパラメタとした．打撃時刻において肘関節は角度 0，速度 0 とした．打撃局面では，脚は関節可動域に達しないように関節角速度を決定した．簡単のため，打撃時刻において

足首関節と膝関節は跳躍時の角度，腰関節は体幹と上腿が直列する角度にした．これらの関節の角速度が打撃時刻において0になるよう打撃局面の関節角速度を決定した．これらの境界条件を基に，打撃時刻における加速度を仮定し，5次方程式を用いて跳躍時刻と打撃時刻の境界条件から関節軌道を与え，関節可動域を超えず，打撃局面における加速度の変化幅が最小となるものを選択した．

各時刻におけるトルクは，各時刻の \mathbf{q} ， $\dot{\mathbf{q}}$ ，および $\ddot{\mathbf{q}}$ から以下の式を用いて計算した．慣性行列 \mathbf{M} ，および重力項とコリオリ力を含む項 \mathbf{h} はラグランジュの方程式を用いて計算した．

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.20)$$

重心加速度と重心回りの角加速度が以下のように与えられるとする．

$$\mathbf{p}_g = \mathbf{M}_g(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_g(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.21)$$

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{M}_L(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3.22)$$

$$\mathbf{M}_g = \begin{pmatrix} m_{gx1} & m_{gx2} & m_{gx3} & m_{gx4} & m_{gx5} & m_{gx6} & m_{gx7} & m_{gx8} \\ m_{gz1} & m_{gz2} & m_{gz3} & m_{gz4} & m_{gz5} & m_{gz6} & m_{gz7} & m_{gz8} \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{M}_L = \begin{pmatrix} m_{L1} & m_{L2} & m_{L3} & m_{L4} & m_{L4} & m_{L5} & m_{L6} & m_{L8} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{h}_g = \begin{pmatrix} h_{gx} & h_{gz} \end{pmatrix}^T \quad (3.25)$$

以上のように変数を設定した．離陸時刻までの関節角速度を以下の式に従って計算した．

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ m_{gx1} & m_{gx2} & m_{gx3} & m_{gx4} & m_{gx5} & m_{gx6} & m_{gx7} & m_{gx8} \\ m_{gz1} & m_{gz2} & m_{gz3} & m_{gz4} & m_{gz5} & m_{gz6} & m_{gz7} & m_{gz8} \\ m_{L1} & m_{L2} & m_{L3} & m_{L4} & m_{L4} & m_{L5} & m_{L6} & m_{L8} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_z \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{\theta}_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h_{gx} \\ h_{gz} \\ h_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_{kne}^{ref} \\ \theta_{elb}^{ref} \\ \theta_{ua}^{ref} \\ p_{gx}^{ref} \\ p_{gz}^{ref} \\ \dot{L}^{ref} \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

離陸時刻からは以下の式に従って関節角速度を計算した．具体的には，左辺第一項の

逆行列を用いて \ddot{q} を計算した.

$$\begin{pmatrix} m_{gx1} & m_{gx2} & m_{gx3} & m_{gx4} & m_{gx5} & m_{gx6} & m_{gx7} & m_{gx8} \\ m_{gz1} & m_{gz2} & m_{gz3} & m_{gz4} & m_{gz5} & m_{gz6} & m_{gz7} & m_{gz8} \\ m_{L1} & m_{L2} & m_{L3} & m_{L4} & m_{L4} & m_{L5} & m_{L6} & m_{L8} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_z \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_5 \\ \ddot{\theta}_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{gx} \\ h_{gz} \\ h_L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{gx}^{\text{ref}} \\ p_{gz}^{\text{ref}} \\ \dot{L}^{\text{ref}} \\ \theta_{\text{ank}}^{\text{ref}} \\ \theta_{\text{kne}}^{\text{ref}} \\ \theta_{\text{hip}}^{\text{ref}} \\ \theta_{\text{ua}}^{\text{ref}} \\ \theta_{\text{elb}}^{\text{ref}} \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

ここで, p_{gx}^{ref} と p_{gz}^{ref} はそれぞれ所与の重心加速度の x 成分と z 成分, \dot{L}^{ref} は, 所与の重心回りの角加速度, $\theta_{\text{ank}}^{\text{ref}}$, $\theta_{\text{kne}}^{\text{ref}}$, $\theta_{\text{hip}}^{\text{ref}}$, および $\theta_{\text{elb}}^{\text{ref}}$ はそれぞれ, 所与の足首, 膝, 腰, 肘関節の角加速度, $\theta_{\text{ua}}^{\text{ref}}$ は所与の世界座標系における上腕の角度である.

打撃における衝突モデル

打撃における衝突について以下に述べる. この衝突には弾性衝突を仮定した. 変数の定義を Table3.3 に示す.

Table3.3 Collision model parameters.

\mathbf{n}	衝突平面に垂直でロボット腕の外側を向いた大きさ 1 のベクトル
v_b	衝突直前のボール速度の衝突平面に垂直な成分
v_r	衝突直前の打撃部位の速度の衝突平面に垂直な成分
\tilde{v}_b	衝突直後のボール速度の衝突平面に垂直な成分
\tilde{v}_r	打撃部位の速度の衝突平面に垂直な成分
\tilde{v}_b	衝突直後のボール速度の衝突平面に垂直な成分
m_b	ボールの質量
m_r	打撃部位の質量

弾性係数 e は以下の式で表される.

$$e = -\frac{\tilde{v}_b - \tilde{v}_r}{v_b - v_r}. \quad (3.28)$$

運動量保存則より, 以下の式が得られる.

$$m_b v_b + m_r v_r = m_b \tilde{v}_b + m_r \tilde{v}_r. \quad (3.29)$$

これらの2式より， \tilde{v}_b は以下の式で得られる．

$$\tilde{v}_b = \frac{(1+e)m_r v_r + (m_b - em_r)v_b}{m_b + m_b} \quad (3.30)$$

さらに， $\dot{\mathbf{p}}_b(t_h + \Delta t)$ は以下の式で得られる．

$$\dot{\mathbf{p}}_b(t_h + \Delta t) = \dot{\mathbf{p}}_b(t_h) + (\tilde{v}_b - v_b)\mathbf{n} \quad (3.31)$$

モデル規範型跳躍打撃動作の概観

提案する動作生成法で生成した跳躍打撃動作について説明する．生成した跳躍打撃動作の離陸時刻までのスナップショットを Fig.3.8 に示す．加えて，離陸時刻から打撃時刻までのスナップショットを Fig.3.9 に示す．これより，(a) 動作開始からしばらくの間，足裏全体で接地しており，爪先での接地へと切り替わること，(b) 離陸時刻までに腕は世界座標系に対して不変の姿勢をとること，(c) 前方への跳躍すること，(d) 離陸時刻から打撃時刻まで着地しないこと，および (e) 打撃時刻において肘が伸展することが分かる．

網羅的なボール軌道の探索に用いたパラメタについて以下に述べる．まず，生じうるボールの軌道を 10^6 パタン生成した．次に，ボール軌道ごとに打撃位置を 10^2 パタン生成した．最後に，この計 10^8 パタンに対して，落下までの時間から打撃において取るべきロボット身体の打撃部位の状態を計算した．ボールの飛行軌道は，打撃されなかった場合に着地する位置および着地までの時間に基づいて与えた．着地位置を $\mathbf{p}_g = [r \cos \theta, r \sin \theta, 0]^T$ と表し， r は 0.1 m から 1.5 m まで等間隔の 100 パタンを試し， θ は 0 から $\pi/2$ [rad] まで等間隔に 100 パタンを試した．着地までの時間は 1.2 s から 1.5 s まで等間隔に 100 パタン試した．打撃時刻におけるボールの高さには 0.45 m から 0.65 m までの範囲を等間隔に 100 点用いた．打撃後にボールが落下するまでの時間は 1 s に設定し，条件を満たすボール軌道を与える打撃時刻における打撃部位の姿勢と速度を，付録の衝突モデルに基づいて計算した．

3.1.3 跳躍打撃動作の定量的解析

生成したボール軌道について述べる．想定した着地点，打撃時刻におけるボールの位置，および代表的なボールの軌道 (Fig.3.10) から，打撃時刻においてボールは初

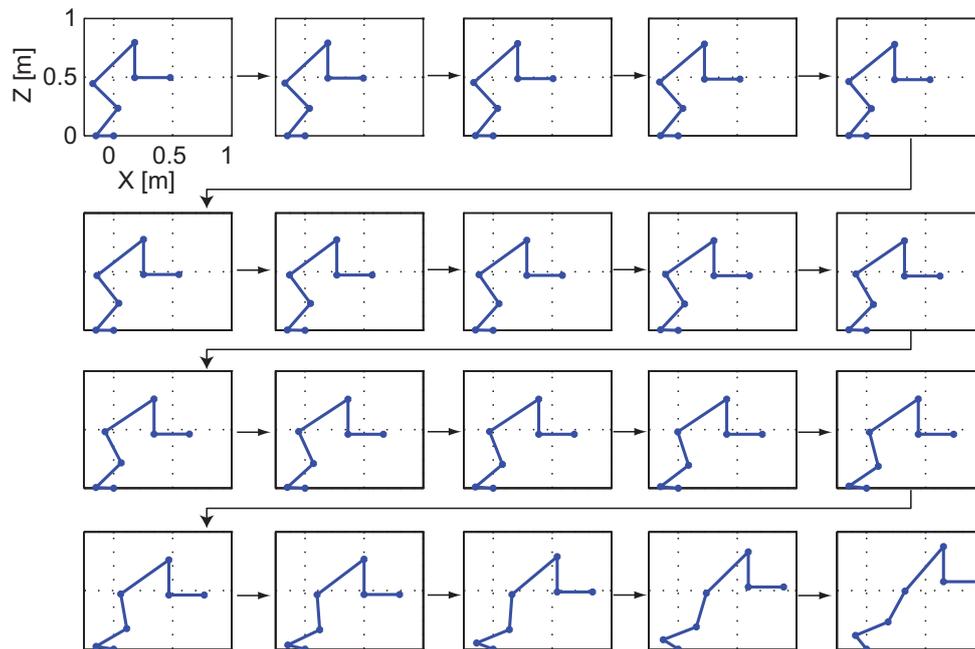


Fig.3.8 Snapshots of jumping motion. Blue lines represent links of the humanoid robot model. Blue dots represent positions of joints of the humanoid robot model. These figures shows below. (a) The humanoid robot stood with the all sole on the ground at first of the motion and stood on its tiptoe later. (b) Arm posture of the robot from the world coordinate system did not change.

期位置から約 2 m の距離にあることが分かる。跳躍打撃動作においてロボットが、1 s 程度の時間で自身の打撃部位をこの青い領域付近に移動させる必要がある。加えて、想定したボール軌道の頂点の高さが 2 m 程度であることが分かる。

計算した打撃における打撃部位の状態について述べる。ボールの初速度、およびボールの打撃時刻における速度 (Fig.3.11), 打撃時刻における打撃部位の速度 (Fig.3.12, Fig.3.11 の紫点の拡大) から、この条件下において、ボールの初期速度水平成分が 3.33–8.75 m/s であること、必要な打撃部位の速度の大きさがボールの初速および打撃時刻における速度の大きさより小さいことが分かる。さらに、打撃時刻における打撃部位の速度の大きさが 1m/s 程度であることが分かる。

以上の計算結果は、実際のボールの振る舞いと誤差がある可能性がある。しかし、この計算によって速度などの定量的な情報を得られたため、実際に跳躍打撃動作の動

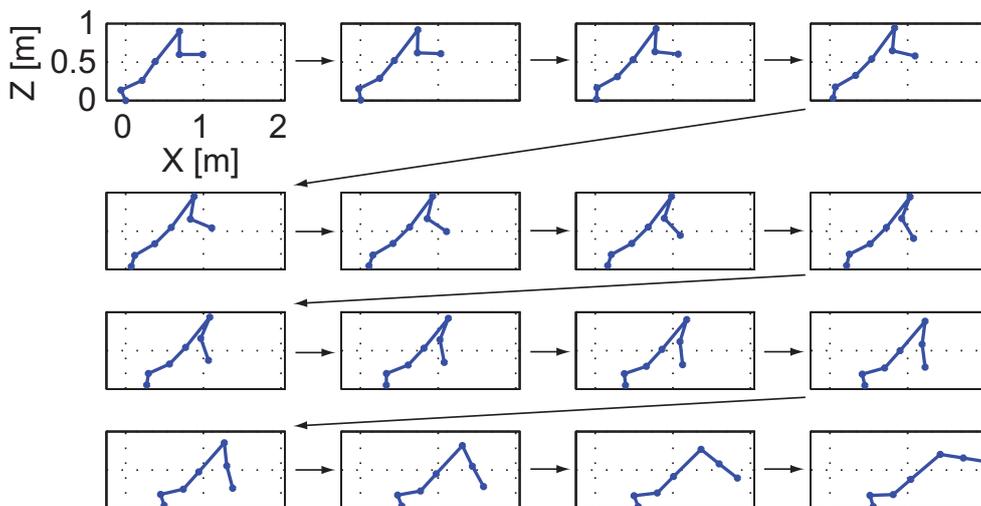


Fig.3.9 Snapshots of hitting motion. Blue lines represent links of the humanoid robot model. Blue dots represent positions of joints of the humanoid robot model. These figures shows below. (c) The humanoid robot jumped forward. (d) The robot did not touch the ground from lifting off to landing. (e) Elbow of the robot extended at hitting.

作とその実験環境を構築する上での指針として貢献したと考える。

3.1.4 打撃範囲を増大する運動特徴

跳躍打撃動作は、前方に加速する過渡的な移動動作であるため、これまでに実現されてきた歩行、走行、連続跳躍、過渡的な垂直跳躍などの動作と様相が異なる。このため、従来の移動動作にはない特徴が、跳躍打撃動作の性能を高める可能性がある。そこで本研究では、特定の特徴を備えた跳躍打撃動作と備えないその動作を比較し、跳躍打撃動作に有用な運動特徴について調べた。前述した網羅的なボール軌道と網羅的な跳躍打撃動作を用いて、特徴を備えた動作や備えない動作のそれぞれについて取りうる打撃部位の位置を比較した。具体的には、(a) 跳躍を含む打撃と含まない打撃を比較し、跳躍することで打撃可能になる領域の大きさを定量的に調べ、(b) 重心回りの回転運動量の有無および (c) 直線的な重心軌道を用いた跳躍と直線的でない重心軌道を用いた跳躍との比較を行った。離陸を含まない打撃動作 (Ground) は、打撃時

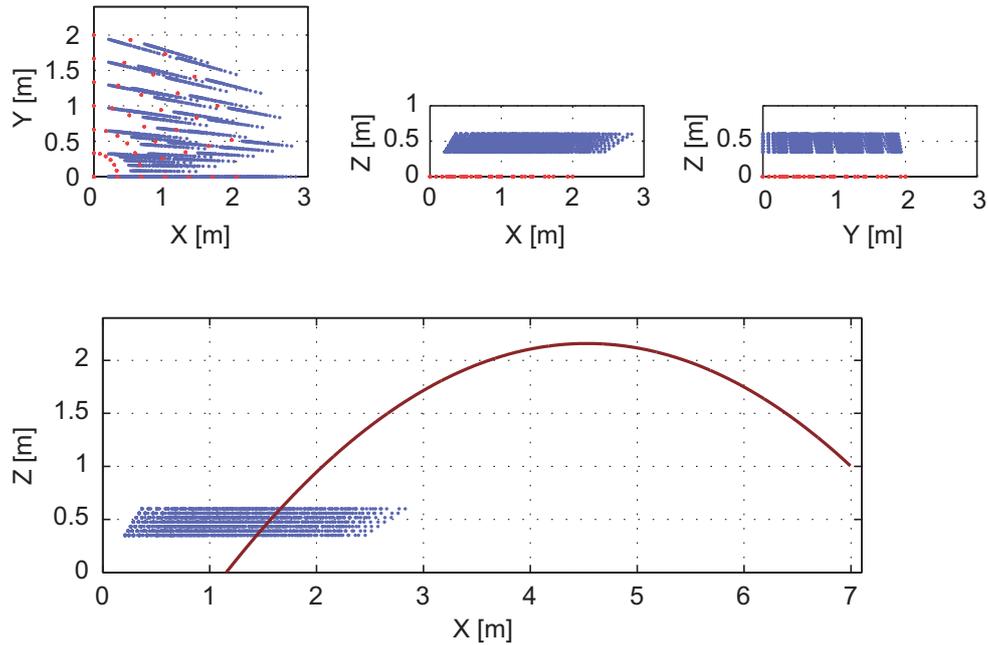


Fig.3.10 Hitting positions, landing positions and a ball trajectory. Blue dots represent hitting positions. Red dots represents ball landing positions. The red line shows a trajectory of a ball. Humnaoid robots need to move thier hitting part to area plotted by blue dots at hitting a ball.

刻における重心位置，重心速度，手先角度，および手先速度を網羅的に与え，床反力の鉛直方向成分と水平方向成分の時系列をスプライン補間し，床反力に基づいて重心軌道を作成し，そこから全身の運動を生成した．重心回りの回転運動量を許容する／しないの比較対象として，重心回りの回転運動量を常に 0 とする跳躍打撃動作 ($L=0$) を生成した．直線的な重心軌道の生成では，ロボット歩行における重心軌道の生成などに広く用いられる **Linear Inverted Pendulum Model (LIPM)** を用いて重心軌道を生成した．

打撃時刻の打撃部位，および打撃された軌道を表した図 (Fig.3.13) から，跳躍によってより遠方に着地するボールも打撃できることが分かる．具体的には，跳躍を備えた動作の打撃部位位置 x 成分の最大値は 1.88 m，跳躍しない打撃動作のそれは 1.33 m であった．一方で，跳躍せずに打撃することで，より短い時間やより長い時間で落下するボールを打撃できることが分かる．これは，跳躍なしの打撃を運動パタン

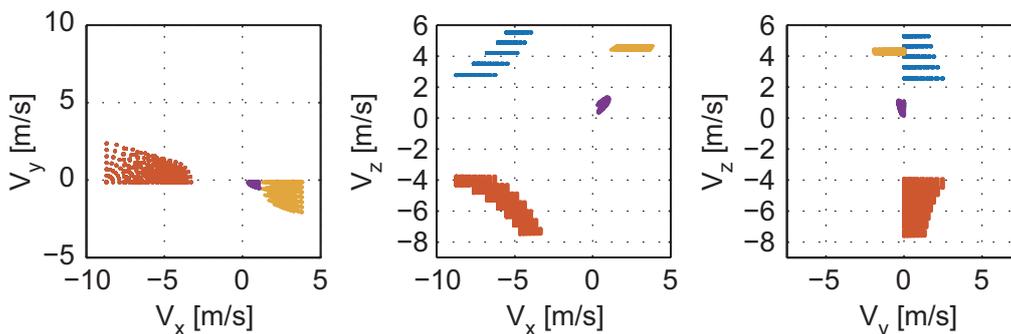


Fig.3.11 Velocity of hitting parts and ball at hitting time and after hitting. Blue dots represent initial velocity of the ball. Red dots represent velocity of the ball immediately before hitting. Yellow dots represent velocity of the ball immediately after hitting. Violet dots represent velocity of a hitting parts of a robot at hitting. Size of velocity of the hitting parts is smaller than velocity of the ball at the start and after hitting.

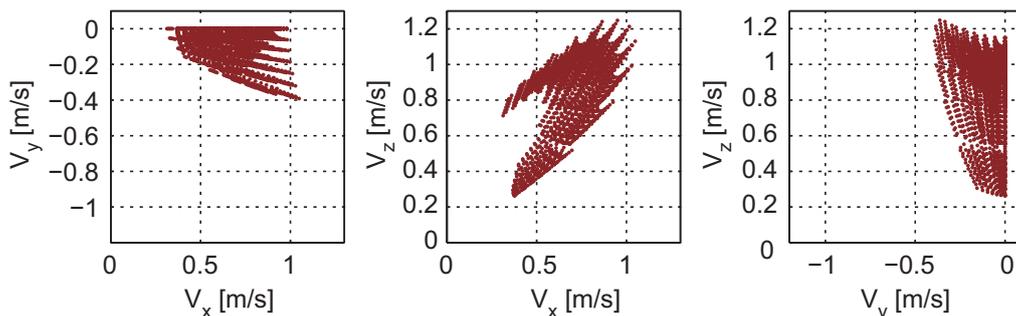


Fig.3.12 Velocity of hitting parts at hitting. Red dots represent velocity of a hitting parts of a humanoid robot at hitting. Plotted area is continuous and the area has non-convex shape.

として獲得しておけば、飛来するボールに応じて跳躍の有無を選択することで、多様な軌道で飛来するボールを打撃可能であることを示唆している。加えて、同図より、重心回りの回転運動量を備えた跳躍打撃動作、および垂直方向の重心変位を許容した動作の方がより遠方に落下するボールを打撃可能であることが分かる。具体的には、跳躍打撃動作に有利な特徴を備えた動作の打撃部位位置 x 成分の最大値は 1.88 m、重心回りの回転運動量を備えた跳躍打撃動作、および垂直方向の重心変位を許容しない

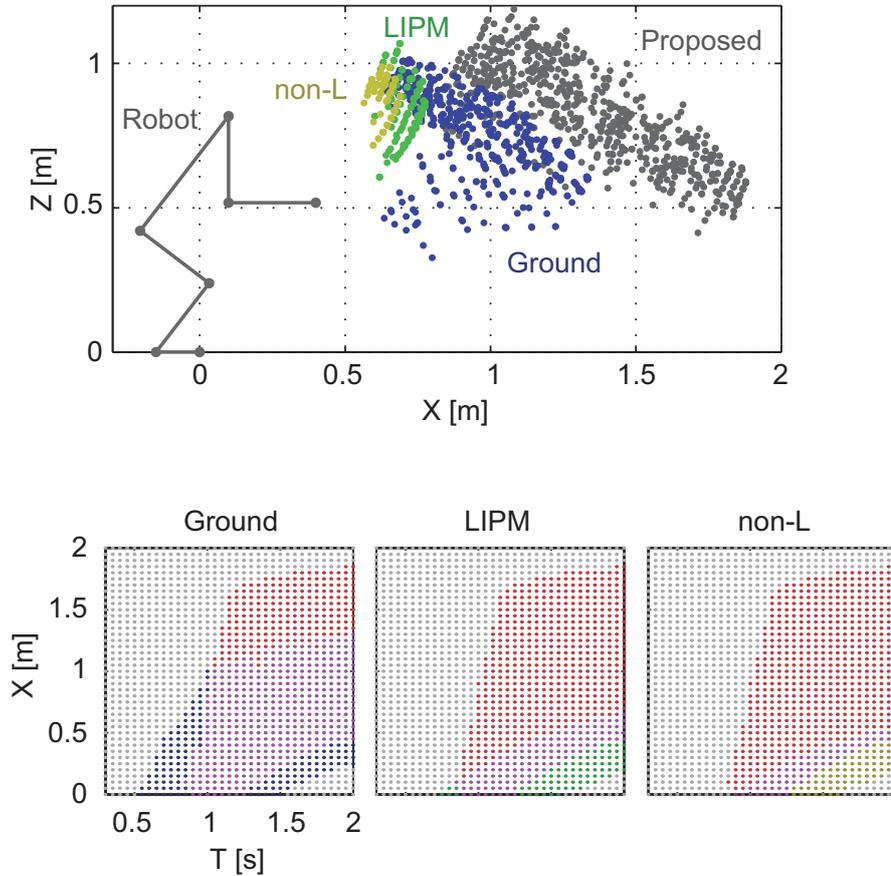


Fig.3.13 Comparison of motion strategies. Positions of hitting parts of a pneumatic robot at hitting time are far than of a typical humanoid robot. Blue dots represent positions of the hitting parts of of the typical humanoid robot at hitting time with jumping and hitting motions based on our proposed method. Red dots represent positions of the hitting parts of a pneumatic robot. Red dots, blue dots and violet dots represent parameters of of ball that can be hit by motions with the moment, that can be hit based on LIPM model and that can be hit based both on the proposed method and on the LIPM model respectively.

動作のそれは 0.77 m, および 0.69 m であった.

Table3.4 Link parameters of the model of typical humanoid robot.

Link	Length [m]	Mass [kg]	Inertia [kgm ²]
1	0.20	1.6	0.0057
2	0.35	9.0	0.0937
3	0.35	9.0	0.0937
4	0.65	19.3	0.6835
5	0.35	9.7	0.1010
6	0.35	9.7	0.1010

3.1.5 身体的特徴が跳躍打撃動作性能に与える影響

跳躍打撃動作に適した身体的特徴について調査を行った。一般的に、ロボット身体の重量と関節出力はトレードオフの関係にある。すなわち、大出力を生成するためにアクチュエータは大型化し、ロボットの重量も大きくなる。関節出力が大きい場合、より重い物体も操作し、運ぶことが可能になる。一方で、重量が増加し、転倒による衝撃力も増加する。軽量な身体を設計した場合に、アクチュエータ出力はより低くなり、操作し、運ぶことが可能な物体の重量は小さくなるが、ダイナミック動作において生成可能な加速度は大きくなる可能性がある。代表的なロボット身体が跳躍打撃動作で打撃可能な範囲を比較することで、重量と出力のトレードオフに対して設計上の指針を得ることが期待できる。代表的なロボットとして、典型的な電磁モータ駆動のロボット (Typical) および空気圧ロボット (Proposed) の身体的特徴に基づくモデルをそれぞれ作成し、前述した動作生成法で網羅的に動作を行わせ、網羅的なボール軌道を用いて打撃可能な領域を調べ、比較した。空気圧ロボットモデルのパラメータには、前掲したものをを用いた (Fig.3.1, Table3.1)。典型的なロボットのモデルのパラメータは、現存する全長 1.4 m、全重量 58.3 kg のロボットを想定して決定した Table3.4, [64]。これは空気圧ロボットモデルと同等の大きさであり、重量はその約 5 倍である。最大トルクは足首、膝、腰、肩、肘の関節でそれぞれ 312, 504, 504, 198, 120 [N・m] と設定した。これは、腰のトルクで比較した場合、6.3 倍であり、トルク重量比は典型的なロボットの方が大きい。

空気圧駆動ロボットの跳躍打撃動作と典型的なロボットの跳躍打撃動作それぞれの打撃されうるボールのパラメタを Fig.3.14 の左に，それぞれの動作を行った場合の打撃時刻における打撃部位の位置を Fig.3.14 の右に示す．これより，空気圧ロボットのモデルが典型的なロボットのモデルよりも遠方に落下するボールを打撃可能であるという結果が得られた．具体的には，空気圧ロボットモデルの打撃部位位置 x 成分の最大値は 1.88 m，典型的なロボットのモデルのそれは 1.09 m であった．一方，典型的なロボットは，初期位置近くに長い時間を経て落下する軌道のボールを打撃できるという結果が得られた．

空気圧ロボットの方が典型的なロボットよりも遠くに落下するボールを打撃できる理由として，全重量がより軽いことが挙げられる．空気圧ロボットと典型的なロボットの跳躍に用いられた加速度ピークを決定するパラメタ A の比較 (Fig.3.15) から，空気圧ロボットが典型的なロボットよりも脚の最大トルクが小さいにも関わらず，大きな加速度を用いて跳躍できたことが分かる．また，典型的なロボットが初期位置近くに長い時間を経て落下する軌道のボールを打撃できる理由として，肩関節においてより大きなトルクを発生でき，短時間でスイングを完了されることが挙げられる．このことから，飛来するボールの重量が大きい場合，跳躍打撃動作を行うロボットの肩関節には，打撃に十分な速度を発生させるだけのトルクが必要であると考えられる．

打撃に成功した場合における，離陸時刻の重心速度の分布について述べる．この分布 (Fig.3.16) から，前方に 1.2–2.8 [m/s] の速度を發揮し，上方に 0.6–2.0 [m/s] の速度で跳躍すれば，シミュレーションと同様の跳躍打撃を生成できると考えられる．

3.2 軽量大ストローク空気圧駆動機構の開発

従来のアクチュエータを用いて前節の内容から導かれる身体性能を満たすことは困難であると判断し，全身ダイナミック動作を行うロボットのために，駆動機構を開発した．

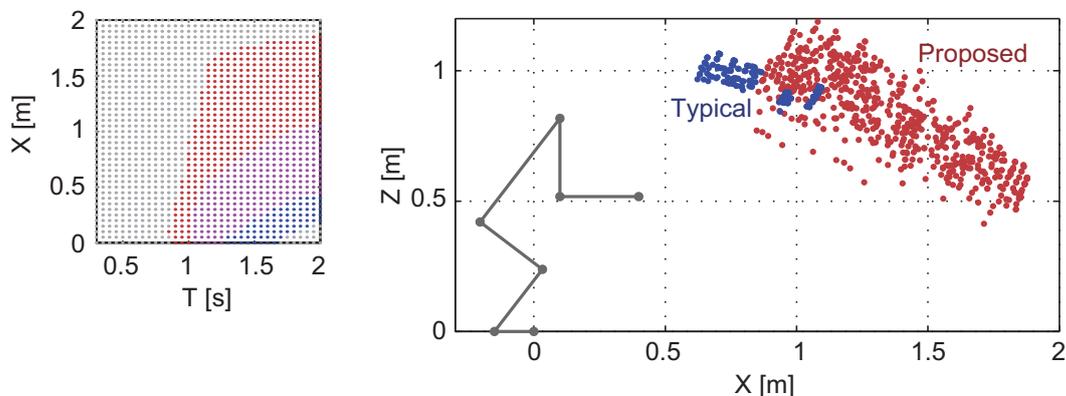


Fig.3.14 Comparison of physical characteristics of robots. Positions of hitting parts of a pneumatic robot at hitting time are far than of a typical humanoid robot. Blue dots represent positions of the hitting parts of of the typical humanoid robot at hitting time with jumping and hitting motions based on our proposed method. Red and blue dots represent positions of the hitting parts of a pneumatic robot and a typical robot respectively.

3.2.1 構造一体型空気圧駆動系の提案

前述したように、即応的全身ダイナミック動作では予期せぬ外乱や衝突が生じるため、バックドライバビリティを備えた機構が望ましい。加えて、環境からの衝撃を緩和するため、軽量な身体が求められる。ゆえに、弾性要素を備える空気圧アクチュエータは有用である。

空気圧アクチュエータである空気圧人工筋は、軽量性、小型、柔軟で設計の自由度が高いなどの利点を備える。このため、空気圧人工筋はダイナミック動作を行うロボットに用いられてきた。一方、空気圧人工筋の課題として可変な長さ一力関係のために限定的な姿勢でしか大出力を発揮できないことが挙げられる。筆者らは、関節のモーメントアーム設計によって高い出力を発揮できる姿勢を増加させ、多様な姿勢でのダイナミック動作を実現した。しかし、空気圧人工筋の他の課題として、そのストローク長が限定的であることが挙げられる。このため、空気圧人工筋と比較して多様な姿勢で安定的に出力でき、制御が容易で、ストロークが大きい空気圧シリンダを即

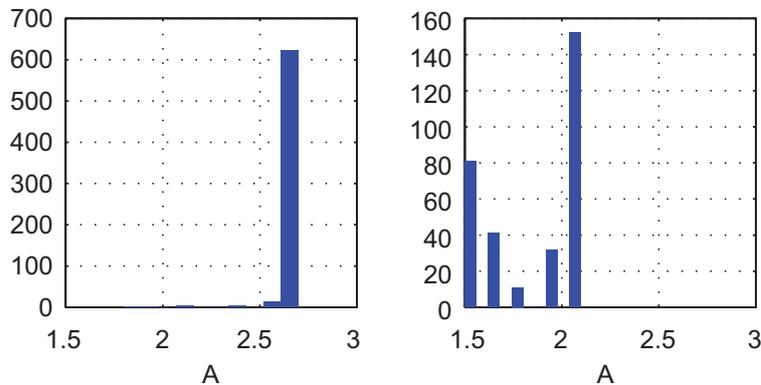


Fig.3.15 Histogram of parameters A used a pneumatic humanoid robot and a typical humanoid robot. Parameters A used the pneumatic humanoid robot are not distribute and they are near value at 2.7 (Left). Parameters A used the typical humanoid robot are distributed widely and they are less than 2.2 (Right).

応的全身ダイナミック動作を行うロボットのアクチュエータに選択した。

空気圧シリンダをダイナミック動作を行うロボットに搭載する時の問題点として、ロッドや固定部の重量が大きく、ロボット重量を増加させることが挙げられる。ロッドや固定部を適切な大きさに設計することには、ピストンの姿勢安定、関連部品の接続の容易さ、駆動部および固定部の頑健性、対故障性の低減などの利点がある。しかし、本研究のように軽量性がもつ重要度が高い場合、これらの部品を同等な機能を有する軽量な材料で代替することが望まれる。このため本研究では、これらの部品を軽量なプラスチック部材やワイヤケーブルで代替することを提案した。ワイヤケーブルでロッドを代替することで、チャンバ間の差圧によって推力を得るためのピストンの表面積は増加し、同一のピストン径でより大きな張力を発揮できる。駆動部におけるワイヤケーブル利用は従来から行われており、そのようなシリンダはケーブルシリンダと呼ばれる。市販のケーブルシリンダを利用することには、部品個体差の低減、入手性の向上などの利点がある。一方で、これにはロボット関節部分の設計が既存シリンダ設計に制約される、端部の重量部材によってロボット重量が増加するなどの問題がある。このため本研究では、自作したケーブルシリンダをロボットの機構系に用いた。

本研究では、空気圧ケーブルシリンダを軽量な材料を用いて自作することに加え

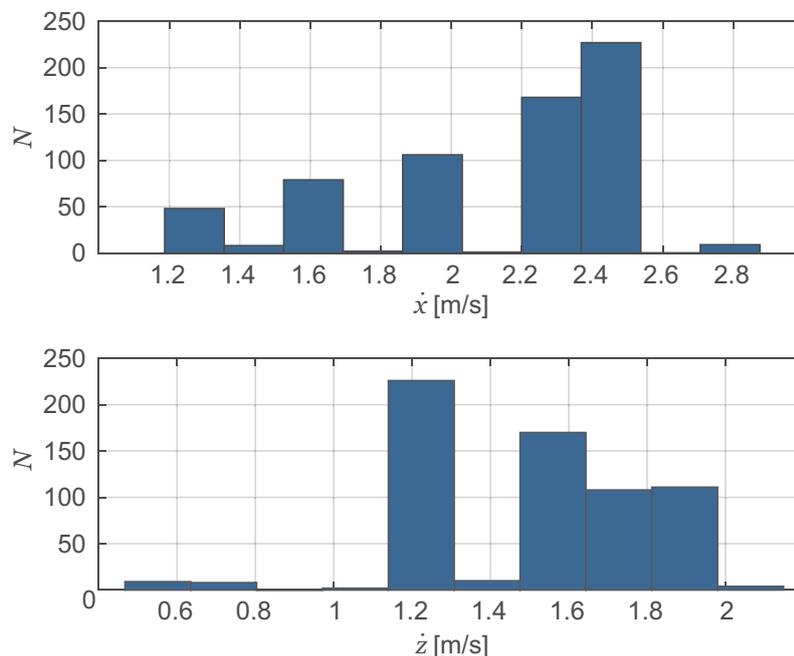


Fig.3.16 Histogram of x and z component of velocity of the robot at its landing.

て、シリンダチューブを構造材として利用することを提案した。薄い、柔らかいシリンダチューブを構造材として用いた場合、シリンダチューブが変形し、摺動性の悪化や、ピストン両側の空気漏れの原因となる。しかし、十分な強度を有するシリンダチューブを用いれば、構造材分の重量、およびロボット身体が占める容積を削減できる。このため、本研究では自作した空気圧ケーブルシリンダを構造材として利用した。以上が、本研究で提案する構造一体型空気圧ケーブルシリンダ (Structure-Integrated Pneumatic Cable Cylinder, SIPC Cylinder) を備えた駆動系の概要である。

3.2.2 提案機構の実装法

構造一体型空気圧ケーブルシリンダを備えた駆動系の具体的な実装方法、すなわち駆動系の構造、駆動原理、材料、および設計上の留意点について述べる。まず、駆動系の構造について述べる。SIPC シリンダを備えたロボットリンクは、ナイロン造形部品を含む回転関節と SIPC シリンダによって構成されており、回転関節の間はこの



Fig.3.17 Appearance of a structure-integrated pneumatic cable cylinder.

シリンダによって接続される (Fig.3.17).

ナイロン部品とシリンダチューブの固定方法について述べる。シリンダ内部にナットが挿入されており、そのナットがナイロン部品の外側から挿入されたネジを受けることでナイロン部品とシリンダが接続される。ネジは向かい合う2箇所に、同一直線状に用いられており、この直線軸周りのモーメントは、ナイロン部品が受けることで固定される。ヒンジピン等を用いてナイロン部品とシリンダを貫通してこれらを固定する選択肢もあるが、ピストンを駆動方向に対して平行に運動させるには、ワイヤはピストンの中心で固定され、ワイヤカバーの中心を通す必要がある。このため本研究では、まずネジによる固定を選択し、その後スリーブとナイロン部品の干渉による固定を採用した。

ワイヤとピストンの固定方法について述べる。切断したワイヤの中央付近にオーバースリーブを圧着し、ワイヤにピストン内を貫通させ、スリーブによってワイヤがピストン前後に移動しないよう、片側のワイヤ両側にロッドを挿入してロッドとスリーブを干渉させ、もう片側はピストン部品とスリーブを干渉させて固定した (Fig.3.18)。ワイヤがピストンを貫通する部分はOリングを用いて空気を遮断した。ピストン内にネジ止めするという方法もある。しかし、ワイヤにロボット全身を駆動する大きな張力が発生するため、固定が不安定化するおそれがある。ワイヤで輪状を作り、ピストンの一部を周回させることで固定する方法もある。しかし、輪状ワイヤ分のピストン長さが増加し、同一長のシリンダチューブに対してストローク長が減少する。このため、本研究ではオーバースリーブを用いた固定方法を採用した。

次に、駆動原理について述べる。SIPCシリンダは主に、ピストン、ワイヤ、ワイヤカバー、プーリおよびシリンダチューブで構成される (Fig.3.19)。SIPCシリンダは

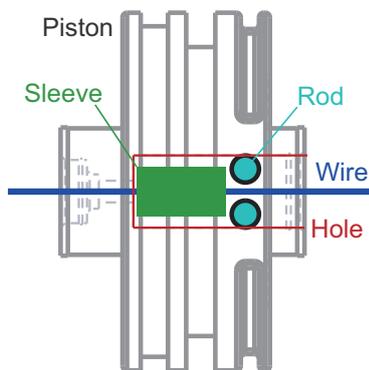


Fig.3.18 Structure of a piston.

複動型シリンダであるため、1つのシリンダ1つの回転関節を双方向に駆動できる。

駆動では、シリンダチューブ内チャンバ間の空気差圧によってピストンに推力が与えられる。この張力がワイヤケーブルで伝達され、関節に備わるプーリを介して関節回転トルクへと変換される。ピストンからワイヤを関節に固定する部分までの間に減速効果をもつダブルプーリ（減速プーリ）を介した場合には、SIPCシリンダが備えた大きなストロークを活用して、同一のワイヤ張力からより大きなトルクを得ることが可能である。

減速プーリを用いない設計には、部品点数が削減できる、減速プーリ部分の摩擦を除ける、減速プーリにワイヤを固定する部分の弛みをなくせるなどの利点がある。一方、減速プーリを用いる設計を採用した場合、シリンダのストロークを最大限に活用し、同一の張力からより大きな関節回転トルクが得られる。加えて、減速プーリを用いることで同一のトルクを得るための関節モーメントアームを小さくできるため、関節をより小さく設計し、軽量化できる。このため、全身を支え、推進するための大きなトルクを必要とする脚の関節には減速プーリを搭載し、腕の関節には搭載しない設計を採用した。この減速プーリを用いた減速は、空気圧人工筋よりも大きなストローク長を有するシリンダで初めて可能になる。減速プーリには、ワイヤ間の重なりを防ぐためにワイヤ径に応じた溝が配置されている。さらに、ワイヤ同士の干渉を避けるため、減速プーリ内のワイヤ固定はワイヤが減速プーリに沿う形で固定できるよう設計した。

一般的なシリンダにおいて、ロッドがチャンバから出入りする部分をロッドカバー

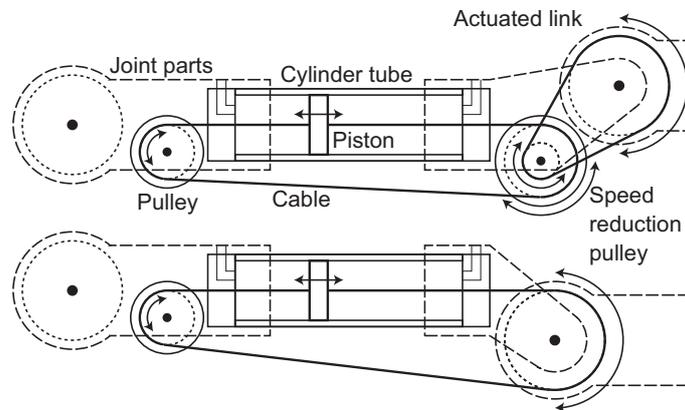


Fig.3.19 Structure of the structure-integrated pneumatic cable cylinder with a speed reduction pulley (top) and without the pulley (bottom).

と呼ぶ。これに倣い，本研究ではワイヤが出入りする部分をワイヤカバーと呼ぶ。ワイヤカバーには，エルボ型のワンタッチ継手が搭載されている。空気遮蔽のため，継手とワイヤカバーの間には O リングを配置した。継手は軸方向，ワイヤカバーから抜ける側に空気の圧力を受ける。このため，ナイロン部材が継手をワイヤカバーに固定している。組み立てを容易にし，メンテナンス性を向上するため，ワイヤカバーに継手を接続した状態でシリンダをナイロン部材に挿入可能なようにナイロン部材を設計した。この設計によって，シリンダ単体で空気遮蔽を確認してからナイロン部材と接続できるため，空気漏れの発見による手戻りの工数が少なくなる。ワイヤにはビニルで被覆されたものを用い，SS 規格の O リングをワイヤカバーとワイヤの間に配置することで，ワイヤが通過するワイヤカバーの部分を遮蔽した。

SIPC シリンダの材料として，ステンレス製のシリンダチューブ，ビニルで被覆された 7x7 構成のステンレス製ワイヤ，プラスチック製のピストンとワイヤカバーを用いた (Table3.5)。シリンダチューブの選択では，動摩擦の小さい低摩擦シリンダや粘性抵抗の小さい高速シリンダを選択することも考えられる。しかし，これらのシリンダは低速シリンダと比較してスティックスリップが生じやすく，制御が困難である。このため本研究では，低速シリンダ (CM2X-Z, SMC) のシリンダチューブを用いた。シリンダチューブとして，引き抜き材の合金アルミパイプを切断し，内側を塗装して自作したものを用いる方法もある。シリンダチューブの材料としてアルミニウム合金を用いることで，大幅な軽量化が期待される。実際にこれを試したが，摺動性の

Table3.5 Materials of the cylinder.

Parts	Material
Cable	Stainless and nylon
Piston	Acrylic and stainless
Wire cover	Nylon, Acrylic
Cylinder tube	Stainless

確保が困難であったため、現在までの実装には市販シリンダのシリンダチューブを用いた。

被覆付きワイヤは被覆のないワイヤと比較して固定部分の強度が低い。しかし、ワイヤカバーを通過する部分での空気遮蔽が必要となるため、これを用いた。ワイヤ径が小さい場合、最小曲げ半径が小さくなり、ワイヤの走行部およびプーリを小型化できる。一方、この場合には使用荷重が小さくなり、負荷に耐えられず断線するおそれがある。このため、前述した設計のためのシミュレーション結果から計算したワイヤ張力、および試用における断線を踏まえて、ワイヤ外径 1.5 mm、被覆外径 2.0 mm のワイヤを用いた。ワイヤとナイロン部材の固定は全てオーバルスリーブによる圧着を用いた。ワイヤが折り返す側のプーリ径が小さい場合、関節部分は小型化し、軽量化できる。一方、この場合にはワイヤの曲げ半径が小さくなり、疲労がより蓄積する。このため、このプーリとしてワイヤ走行半径が 10 mm のものを用いた。軽量化のため、プーリの材料にはポリアセタールを選択した。

ピストンの主な材料としてアクリルを選択し、光造形による 3 D プリントで製造した。衝撃により耐える材料として、ABS 樹脂を用いる、切削加工を行うなどの方法もある。ピストンに搭載されたワイヤ周辺の空気遮断に関連する部品が小さく、造形上の精度が必要であり空気遮断性に優れていたため、材料にはアクリルを選択した。

ワイヤカバーは、ナイロン部品とアクリル部品を主に複合して作製した。空気遮断の部分にはアクリル部品を用い、ナットを内挿し、関節部分のナイロン部材と接続する、力を受ける部分にはナイロン部材を用いた。ワイヤカバーとシリンダチューブの間には O リングを配置して空気を遮断した。O リングの材料として、耐圧性、耐摩耗性に優れたニトリルゴムを用いた。

3.2.3 出力重量比の評価

提案した駆動系設計では、軽量化のためにプラスチック部品を用いた。しかし、金属部品をプラスチック部品で代替することで減少する具体的な重量は、実装全体を典型的なシリンダと比較することで初めて明らかになる。加えて、ロッドをワイヤで代替することでピストン表面積が増加した。この具体的な増加量は計算によって初めて明らかになる。そこで、これらの定量的効果を調べるため、ワイヤシリンダと典型的なシリンダを構成部品の重量、および出力重量比の観点から比較した。この比較について以下に述べる。

まず、構成部品群の重量を比較した (Fig.3.20)。図から、典型的なシリンダではピストンロッドが大きな重量比率を占めていること、その重量がワイヤおよびプラスチック部品の代替によって削減されたこと、同様にロッドカバーを軽量のワイヤカバーによって代替することでも重量が削減されたことなどが分かる。具体的には、 $D = 40$ [mm] の場合、ピストンロッド代替によって 471 g から 32 g へと 439 g、93% の重量が削減され、全体では、1110 g から 491 g へと 620 g、56% の重量が削減された。

以上の検討では、重量に与える素材の変更とサイズの減少の効果が混在している。このため、これらの変化が与える影響を別個に調べた。

方法について述べる。重量削減に強く影響したロッドカバー／ワイヤカバーとロッド／ワイヤに着目した。それぞれの典型的な部品をナイロン部品で代替した時の部品重量を推定し、典型的部品、ナイロン部品で代替した部品、および提案設計法における部品の重量をそれぞれ比較した。部品重量の推定には、ロッドの材料であるステンレス、ワイヤカバーの材料であるアルミニウム、ナイロンそれぞれの比重を用いた。ここで、ステンレス、アルミニウム、ナイロンの比重をそれぞれ、7.93、2.70、1.08 とした。

結果について述べる (Fig.3.21)。図の上段がロッド／ワイヤの重量、下段がロッドカバー／ワイヤカバーの重量を表している。図から、ナイロン部材でロッドを代替する場合よりもワイヤを用いた方が重量が小さいことが分かる。加えて、シリンダ内径 25 mm の場合には、ナイロンでロッドカバーを代替するよりも、提案する設計によって重量を削減できたことが分かる。一方で、シリンダ内径が 32 mm の場合およ

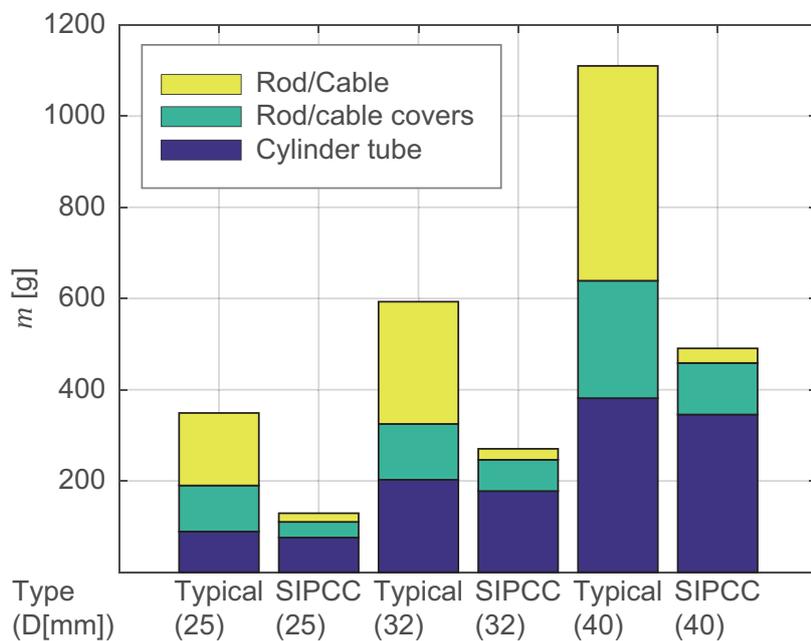


Fig.3.20 Mass composition of typical cylinders and proposed ones.

び 40 mm の場合には、提案する設計よりもナイロンでロッドカバーを代替する方が重量を削減できることが示された。したがって、重量の観点から言えば、耐久性に問題がない場合に限り、ナイロン部品による代替でも提案する設計と同等の重量削減が期待できる。すなわちこの結果は、直動部分のサイズが制約されない場合において、プラスチック部品での代替が有用であることを示す。本研究で提案する設計は、これに加えて、回転関節のコンパクトな実装が要求される場合など、サイズの制約がある場合においても有用であると考えられる。

次に、出力重量比の比較について述べる。出力重量比の計算方法について説明する。同一の差圧から発生するシリンダの推力を計算した。次に、ストロークに応じたシリンダの重量を計算した。そして、シリンダの推力とシリンダの重量から出力重量比を求めた。

比較対象となる典型的なシリンダとして SMC の CM2 シリーズの標準形を想定し、そのパラメタを用いた。

ストロークに応じたシリンダ重量の計算方法について述べる。ストローク l に応じ

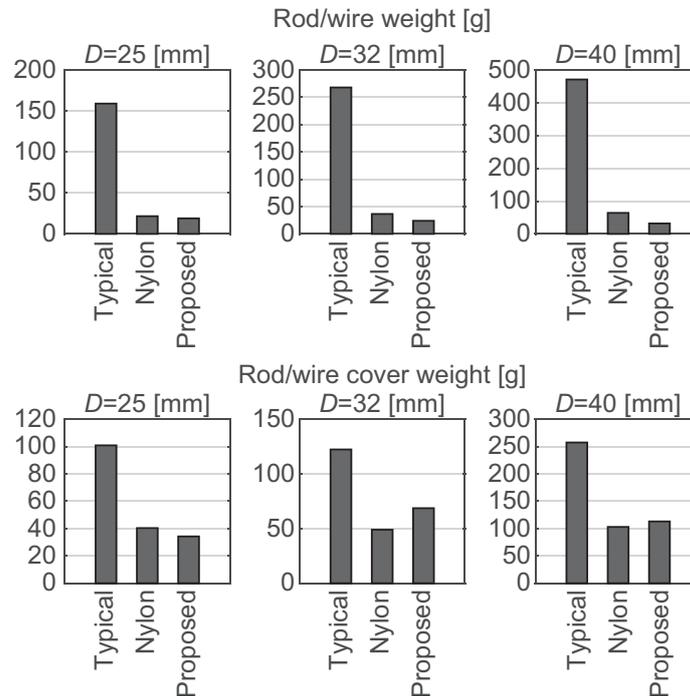


Fig.3.21 Mass composition of typical cylinders, nylon cylinder and proposed ones.

た重量を以下の式に基づいて計算した。

$$m(l) = k_{\text{stk}}l + m_0 \quad (3.32)$$

ここで、 k_{stk} はストロークの増加に応じて増加する重量の比率を表す係数 (Table3.6), m_0 はストロークが 0 のシリンダを仮定した時のその重量である。典型的なシリンダの係数 m_0 および k_{stk} は、シリンダのカタログに基づいて選択した。ワイヤシリンダの係数 k_{stk} は、ピストンチューブの密度と厚み、ピストンの長さ、およびワイヤカバーに重なる部分のピストンチューブの長さから計算した。ピストンチューブの外径を測定し、その厚みを計算した結果、内径 25 mm の場合 0.90 mm, 内径 32 mm の場合 0.55 mm であったため、これを用いた。ピストンの長さを計測した結果、内径 25 mm の場合 31 mm, 内径 32 mm の場合 27.5 mm であり、ワイヤカバーに重なる部分のピストンチューブの長さを計測した結果、内径 25 mm の場合 15 mm, 内径 32 mm の場合 16 mm であったため、これを用いた。長さとしリンダの厚みからシリンダチューブの体積を計算し、シリンダの密度を 7.93g/cm^3 として体積から質量を計算

Table3.6 Parameters of cylinders.

Type	Typical	Wire	Typical	Wire
Inner diameter [mm]	32	32	25	25
k_{stk} [kg/m]	1.6	0.74	1.2	0.51
m_0 [kg]	0.28	0.16	0.21	0.14

Table3.7 Calculated force of cylinders.

Type	Typical	Wire	Typical	Wire
Inner diameter [mm]	32	32	25	25
Force [N]	414.7	481.5	247.4	293.5

した。

得られた結果 (Fig.3.22) より, 調べたストローク, 内径の全ての場合においてワイヤシリンダが典型的なシリンダよりも高い出力重量比を備えていることが分かる。右図より, 全ての場合においてワイヤシリンダが典型的なシリンダよりも軽量であることが分かる。具体的な重量比較のために, これらのシリンダの重量の平均値の比率を計算した。その結果, 典型的なシリンダの重量に対してワイヤシリンダの重量は, 内径 32 mm の場合 51.8 % であり, 内径 25 mm の場合 54.6 % であることが分かった。

さらに, 計算されたシリンダの推力比較 (Table3.7) から, ワイヤシリンダが同一の内径を備えた典型的なシリンダよりも, 大きな推力を得られることが分かる。具体的な推力比較のために, これらのシリンダの推力の比率を計算した。その結果, 典型的なシリンダの推力に対してワイヤシリンダの張力は, 内径 32 mm の場合 16.1 % 大きく, 内径 25 mm の場合 18.6 % 大きいことが分かった。

3.3 速度と加速度を最大化する空気圧駆動系設計法

提案した空気圧駆動系の設計パラメタ決定方法について以下に述べる。

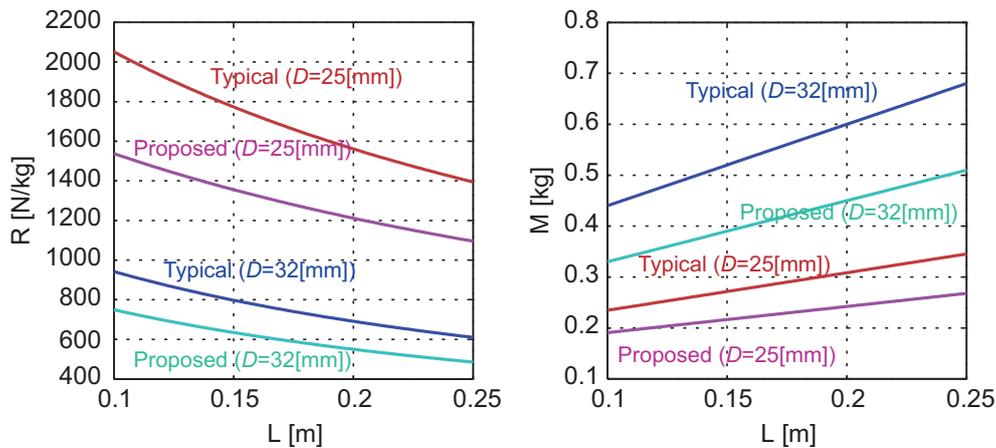


Fig.3.22 Force to weight ratios of wire cylinders are higher than typical ones. Force to weight ratios comparison (left). Weight comparison (right).

3.3.1 空気ダイナミクスを考慮した設計パラメタの決定

即応的全身ダイナミック動作において、特に脚の関節は、急加速のために短時間で大きなトルクを発生させる必要がある。静的な力のつり合いのみを考えた場合、内径が大きいシリンダほど張力は大きく、大きなトルクが得られる。しかし実際には、シリンダへの給気速度には上限があるため、内径が大きいシリンダを用いた場合、チャンバ体積が増大し、張力増加に時間を要し、短時間で十分な力を得られないおそれがある。そこで本研究では、圧縮空気の流入による内圧の動的変化を考慮して、SIPCシリンダ部の寸法を決定した。具体的には、所与のロボットの大きさ、重量、空気系特性から、過渡的ダイナミック動作における速度を最大化するパラメタを探索した。所与の設計パラメタには、(a) ロボット上肢の総重量、(b) 脚のリンク長、(c) 供給される圧縮空気の圧力および (d) バルブのオリフィス径を設定した。一方、設計パラメタには、(i) シリンダチューブの内径、(ii) 関節モーメントアーム、および (iii) 減速比を設定した。

まず、異なる設計パラメタを備えた脚が最大速度で伸展する運動をシミュレーションし、伸展速度を最大化するシリンダチューブ内径および関節トルクーワイヤ張力比を決定した。次に、同一のリンク長で異なる関節軸の配置および異なる減速比を備

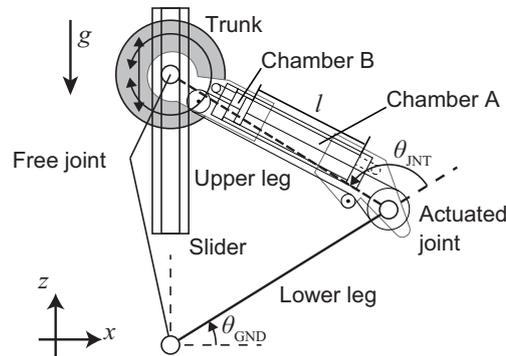


Fig.3.23 Model with a pneumatic cylinder actuating one rotary joint.

えたリンクのシリンダチューブ長さを計算し、所与の関節可動域を満たし、シリンダチューブの長さを最大化する関節軸の配置を設定した。

シミュレーションで用いた脚モデルとそのダイナミクスの計算方法について述べる。このモデルは SIPC シリンダの設計パラメタが即応動作に与える効果を観察するための最も単純なモデルである (Fig.3.23)。図において、 l はピストンの変位、 g は重力係数、 θ_{GRD} は地面付近の関節角度、 θ_{JNT} は駆動関節の角度を表している。このモデルは 2 つのリンク、体幹に固定された上腿と下腿を有しており、4 つの関節自由度を有し、各関節はスライダ上の垂直運動と回転運動、SIPC シリンダに駆動される回転運動、地面上での回転運動をそれぞれ行う。スライダでは垂直方向の力のみが発生し、鉛直方向の摩擦は無視した。

次に、このモデルのダイナミクスの計算方法について述べる。モデルの運動方程式は以下のように書ける。

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{H}(\dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{f}_{\text{ex}}, \quad (3.33)$$

ここで、変数の上の点は時間の微分を表す。点 1 つは一次の微分、点 2 つは二次の微分である。関節ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ は $\boldsymbol{\theta} = [\theta_{\text{GRD}}, \theta_{\text{JNT}}]^T$ 、 2×2 の行列 \mathbf{M} は慣性項を含む行列、 2×1 の行列 \mathbf{H} は遠心力、コリオリの力および重量の項を含む行列である。ラグランジュ方程式を解き、 \mathbf{M} および \mathbf{H} を計算した。ベクトル $\boldsymbol{\tau} = [0, \tau_{\text{JNT}}]^T$ は内力としてトルクを表すベクトル、ベクトル $\mathbf{f}_{\text{ex}} = [f_{\text{SLD}}, 0]^T$ はスライダから与えられる外力を表すベクトル、 \mathbf{J} は以下のように定義されるヤコビアンである。

$$\dot{\mathbf{r}}_{\text{TRK}} \equiv \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (3.34)$$

ここで $\mathbf{r}_{\text{TRK}} = [r_x, r_z]^T$ は胴体リンクの世界座標系における位置を表す。この式の両辺を微分して以下の式を得る。

$$\dot{\mathbf{r}}_{\text{TRK}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}\boldsymbol{\theta}. \quad (3.35)$$

(3.33) および (3.35) に基づいて、 $\ddot{r}_x = 0$ と仮定し、逆行列を用いて $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ を計算した。

駆動関節のトルクは以下のように計算した。

$$\tau_{\text{JNT}} = l_{\text{MA}}(F_p - F_{\text{FRC}} - \beta\dot{l}), \quad (3.36)$$

ここで、 l_{MA} は駆動関節のモーメントアーム、以下のように表される \dot{l} はピストン変位の時間微分、

$$\dot{l} = -l_{\text{MA}}\dot{\theta}_{\text{JNT}}, \quad (3.37)$$

F_p はワイヤ張力、 F_{FRC} は動摩擦力、 β は粘性係数である。ワイヤ張力は以下の式を用いて求めた。 $F_p = (p_A - p_B)S_{\text{PTN}}$ 、ここで添字“**A**”および“**B**”はチャンバ **A** および **B** を表す。 p はチャンバの内圧、以下の式で表される S_{PTN} はピストンの有効断面積である。 $S_{\text{PTN}} = \pi(D_{\text{IN}}^2 - D_{\text{CB}}^2)/4$ 。ここで、 D_{IN} はシリンダチューブの内径、 D_{CB} はワイヤの直径である。

続いて、シミュレーションで用いた空気の動的変化モデルについて述べる。理想気体の状態方程式に基づいて、 \dot{p} を以下の式で計算した [113]。

$$\dot{p} = kRT \frac{\dot{m}}{V} - k \frac{p\dot{V}}{V}, \quad (3.38)$$

ここで k は空気の比熱比、 R は気体定数、 T はチャンバの温度、 \dot{m} はオリフィス径を通る質量流量、 V はチャンバの体積である。ピストンのストローク長 l_{STK} を用いて、ピストンの変位を $l = l_{\text{STK}} - l_{\text{MA}}\theta_{\text{JNT}}$ として計算した。大気温度とシリンダの温度は等しいと仮定した。従来研究では、断熱変化が仮定された [181]。このモデルの場合、シリンダの温度は 0°C まで低下する。しかし、このような温度変化は非現実的であり、等温変化に近似できる実験的事実 [3] も考慮し、大気中および流入空気からの熱流入によって温度は一定に保たれると仮定した。チャンバの体積と時間変化は以下のように計算した。 $V_A = lS_{\text{PTN}}$ 、 $V_B = (l_{\text{STK}} - l)S_{\text{PTN}}$ 、 $\dot{V}_A = \dot{l}S_{\text{PTN}}$ 、 $\dot{V}_B = -\dot{l}S_{\text{PTN}}$ 。経路を通る空気の温度は一定であると仮定し、質量流量を以下の式で求めた。

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{S_{\text{ORF}}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \frac{2}{k-1}} p_U \sqrt{\left(\frac{p_U}{p_D}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_U}{p_D}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, & \left(\frac{p_U}{p_D} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right), \\ \frac{S_{\text{ORF}}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \frac{2}{k+1}} p_U, & \left(\frac{p_U}{p_D} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right), \end{cases} \quad (3.39)$$

ここで、 S_{ORF} はオリフィスの有効断面積、 p_U および p_D は上流および下流の圧力である。同様の実機を作成し、最大速度で空気供給した場合の圧力変化を観察した。この観察に基づき、動摩擦力の大きさと粘性係数を決定した。加えて、この観察からオリフィス断面積は S_{ORF} バルブが完全に開く時刻 t_A まで線形に増加し、その後一定であると仮定した。この仮定に基づいて、バルブ開始から時間 t 経過した時のオリフィス断面積を以下のように計算した。

$$S_{\text{ORF}}(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{S}_{\text{ORF}}}{t_S} t, & (t < t_S), \\ \tilde{S}_{\text{ORF}}, & (t \geq t_S), \end{cases} \quad (3.40)$$

シミュレーションでは、実機の傾向を考慮し、シリンダチューブの内径に応じてモデルの質量を増加させた。体幹の質量 m_{TRK} を用いて、上腿リンクと下腿リンクの質量を以下のように決定した。 $m_{\text{UPR}} = m_{\text{LNK}} + m_{\text{TRK}}$ and $m_{\text{LWR}} = m_{\text{LNK}}$. $m_{\text{LNK}} = \rho_{\text{SLS}} l_{\text{CDR}} \pi (D_{\text{OUT}}^2 - D_{\text{IN}}^2) / 4 + \rho_{\text{NLN}} l_{\text{NLN}} \pi D_{\text{OUT}}^2 / 4$. ここで、 D_{OUT} はシリンダチューブの外径、 ρ_{SLS} および ρ_{NLN} はステンレスとナイロンの密度である。 l_{CDR} はシリンダチューブの長さ、 l_{NLN} はナイロン部品の長さであり、リンク長に対する関係を $l_{\text{CDR}} = l_{\text{LNK}} - l_{\text{NLN}}$ と設定した。簡単のため、上腿リンクと下腿リンクの長さは同じ l_{LNK} であると設定した。ピストンの長さおよびワイヤカバーの合計長さ l_{PTN} を用いて、ピストンのストローク長を $l_{\text{STK}} = l_{\text{CDR}} - l_{\text{PTN}}$ として計算した。加えて、実際のシリンダチューブの寸法から、シリンダチューブの内径と外径の関係は $D_{\text{OUT}} = 1.05 D_{\text{IN}}$ と仮定した。

3.3.2 空気の動的変化を考慮した設計パラメタ最適化

次に、実験設定を説明する。シミュレーションでは、MATLAB2015b を用いてタイムステップ 10^{-4} s でロボットの運動を計算した。初期状態として、関節角度を $\theta_{\text{JNT}} = 5\pi/6$ [rad]、関節角速度を $\dot{\theta}_{\text{JNT}} = 0$ [rad/s] と設定した。大気圧を p_{RM} として、チャンバ B の初期圧力を $p_B = p_{\text{RM}}$ とした。チャンバ A の初期圧力は力のつり合いから計算し、 $p_A > p_{\text{SPY}}$ となる条件を省いた。 $\theta_{\text{JNT}} < \pi/6$ となる時刻を運動終了時刻と定義し、その時刻における体幹の垂直方向の速度 \dot{r}_z を評価関数として用いた。跳躍では、離陸時の鉛直方向の重心加速度が重力加速度よりも大きくなる必要がある。跳躍は、同一の限定的な関節可動域において関節を駆動して加速する運動であるため、運動終端の速度と加速度が同等に扱えると考え、速度を評価関数とした。空気の

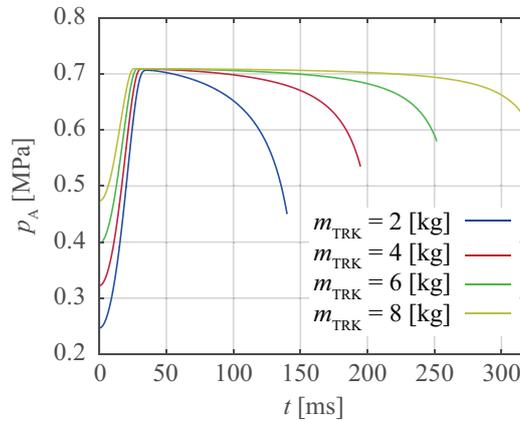


Fig.3.24 Pressure in the chamber A increased once and decreased. Timing of the decreasing of the pressure became later and amount of the decreasing became smaller as mass of the trunk increased. These results are calculated with $p_{SPY} = 7p_{RM}$, $D_{IN} = 40$ [mm] and $l_{LNK} = 250$ [mm].

動的変化が設計パラメタに与える影響について調べるため、この変化を無視した条件と考慮した条件について調べた。空気変化を無視した条件では、運動中 $p_A = p_{SPY}$ であるとした。

実験のパラメタには以下の値を用いた。 $p_{RM} = 0.101$ [MPa], $D_{CB} = 2$ [mm], $l_{MA} = 50$ [mm], $\rho_{SLS} = 7.9$ [cm³/g], $\rho_{NLN} = 1.1$ [cm³/g], $l_{NLN} = 40$ [mm], $l_{PTN} = 50$ [mm], $k = 1.4$, $R = 8.31$, $g = 9.81$ [m/s²], $t_S = 40$ [ms], $\tilde{S}_{ORF} = 57$ [mm²], $\beta = 35$ [N · s/m], $F_{FRC} = 72$ [N]. 実験では、シリンダチューブ内径を 2 mm ごとに 25 mm から 55 mm まで変化させ、目標圧力を $0.5p_{RM}$ ごとに $6p_{RM}$ から $10p_{RM}$ まで変化させ、胴体質量 m_{TRK} を 0.5 kg ごとに 2.0 kg から 10.0 kg まで変化させ、リンク長 l_{LNK} を 10 mm ごとに 250 mm から 500 mm まで変化させた。

実験結果について以下に述べる。実験の脚伸展におけるチャンバ A の内圧変化において、内圧は一度上昇し、その後下降することが確認された (Fig.3.24)。この原因について考察すると、(3.38) から \dot{V} の増加に伴って \dot{p}_A は減少し、負の値をとることが分かる。このため、運動の後半においてピストン速度 \dot{v} およびチャンバ体積の変化速度 \dot{V} が増加し、チャンバ内圧 p_A が減少したと考えられる。

次に、シリンダチューブ内径が性能に与える影響について述べる。空気の動的変化を無視した場合、評価関数である運動終了時刻の垂直速度 m_{TRK} の値は内径の増加に

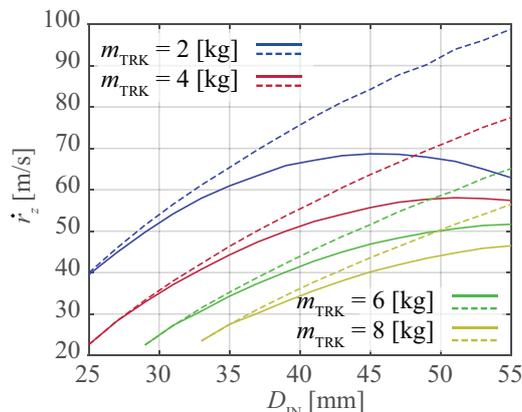


Fig.3.25 Velocity of the trunk at the end of motion increased as inner diameter of the cylinder tube increased in cases ignoring air dynamics (dashed lines) and the velocity increased and decreased as the diameter increased in cases considering the air dynamics (solid lines) with $m_{\text{TRK}} = 2.0$ [kg]. These results were calculated with $p_{\text{SPY}} = 7p_{\text{RM}}$ and $l_{\text{LNK}} = 250$ [mm].

応じて単調に増加した。(Fig.3.25)。一方、空気の動的変化を考慮した場合、内径の増加に応じて評価値は一度増加し、その後減少した。空気の動的変化を無視した場合、最適なシリンダチューブ内径 D_{IN} は 55 [mm] である。このシリンダチューブ内径を備えた脚が空気の動的変化の影響を受けた場合、垂直速度は $\dot{r}_z = 4.07$ [m/s] となると予想される。空気の動的変化を考慮した場合、最適なシリンダチューブ内径 D_{IN} は 45 [mm]、垂直速度は $\dot{r}_z = 4.49$ [m/s] となると予想される。このことから、この条件下で空気の動的変化を考慮することで、この変化を無視した場合の 1.10 (= 4.49/4.07) 倍の速度が得られる可能性が示唆される。

低速な運動を行うロボットの評価では、関節トルク τ_{JNT} が内径 D_{IN} について増加するという見込みは妥当である。一方、実験結果は高速な運動を行う空気圧ロボットの評価と設計パラメタの決定において、空気の動的変化を考慮する重要性を実験結果は示している。

空気の動的変化を考慮する場合と無視する場合との違いは、リンク長を変化させた場合や供給圧力を変化させた場合にも同様に見られた。この違いは、小さな体幹質量、短いリンク長、小さな供給圧力の場合に顕著であった。これは、Fig.3.24 に見られるチャンバの体積変化の影響がこれらの条件の下で大きくなったためであると推測

される。

関節モーメントアームの決定法について以下に述べる。関節モーメントアーム l_{MA} は関節トルクは τ_{JNT} および関節サイズを決定づける。具体的には、同一のワイヤ張力から関節モーメントアームに比例した関節トルクが生み出される。減速プーリは同一のモーメントアームから生じる関節トルクおよび同一の関節可動域を満たすのに必要なピストンのストローク長を変化させる。このため、運動速度を最大化するために、適切なモーメントアームと減速比を設定することが重要である。これらの決定は以下の手順で行う。第一に、空気ダイナミクスを考慮したシミュレーションを行い、トルクー張力比を決定する。第二に、決定されたトルクー張力比を満たすように、幾何的な解析を通じてモーメントアームと減速比を決定する。

設計パラメタを示した図において (Fig.3.26), l_{IN} は減速プーリの内側の半径であり, l_{OUT} は減速プーリの外側の半径である。トルクー張力比は以下のように計算した。

$$\tilde{l}_{MA} \equiv \frac{l_{OUT}}{l_{IN}} l_{MA}. \quad (3.41)$$

関節トルクは以下の式で求めた。

$$\tau_{JNT} = \frac{l_{OUT}}{l_{IN}} l_{MA} (F_p - F_{FRC} - \beta \dot{l}) = \tilde{l}_{MA} (F_p - F_{FRC} - \beta \dot{l}). \quad (3.42)$$

このピストン速度 \dot{l} は以下の式で与えられる。

$$\dot{l} = -\frac{l_{OUT}}{l_{IN}} l_{MA} \dot{\theta}_{JNT} = -\tilde{l}_{MA} \dot{\theta}_{JNT}. \quad (3.43)$$

前述した高速な脚伸展動作をシミュレーションし、計算には (3.42) と (3.43) の代わりに (3.36) と (3.37) を用いた。シリンダ内径, 供給圧力, およびリンク長はそれぞれ以下のように設定した。 $D_{IN} = 40$ [mm], $p_{SPY} = 7p_{RM}$, $l_{LNK} = 250$ [mm]. 体幹重量 m_{TRK} を 0.5 kg 刻みで 2.0 kg から 10.0 kg まで変化させ, トルクー張力比 \tilde{l}_{MA} を 2 mm 刻みで 20 mm から 60 mm まで変化させた。

実験結果について以下に述べる。空気の動的変化を無視した条件において、脚伸展動作終了時刻における体幹の垂直速度は、トルクー張力比 \tilde{l}_{MA} の増加にしたがって単調に増加した (Fig.3.27)。一方、空気の動的変化を考慮した条件では、体幹の垂直速度はトルクー張力比 \tilde{l}_{MA} の増加にしたがって一度増加し、その後減少した (Fig.3.27)。これは、空気の動的変化を考慮して設計パラメタを決定することで 1.02 (= 4.35/4.25) 倍の性能向上が行える可能性を示す。

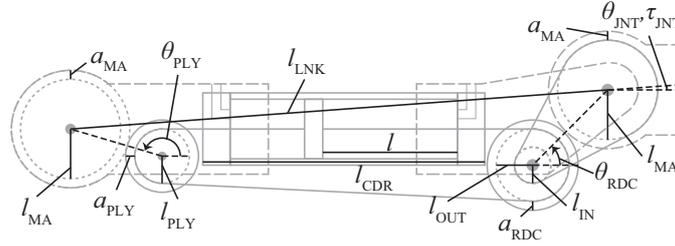


Fig.3.26 Parameters of the model of the link with a reduction pulley and a structure-integrated pneumatic cable cylinder.

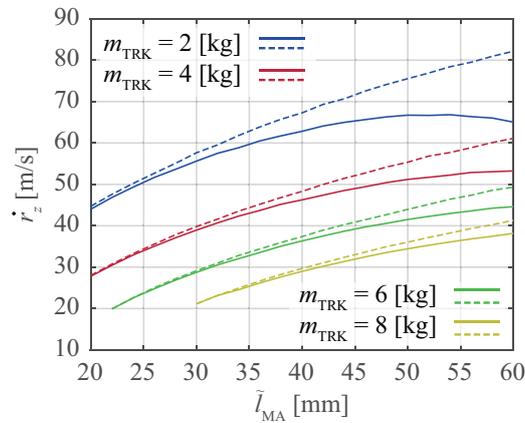
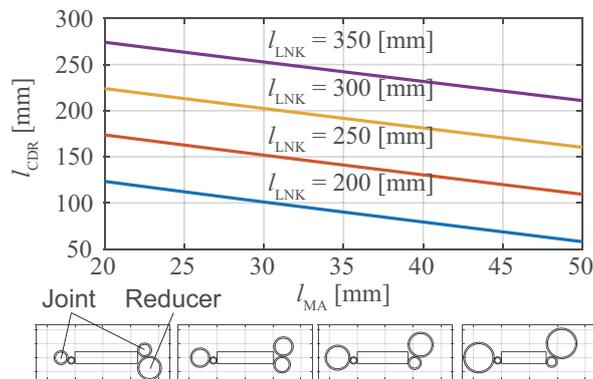


Fig.3.27 Velocity of the trunk at the end of motion increased as the ratio of increased in cases ignoring air dynamics (dashed lines) and the velocity increased and decreased as the diameter increased in cases considering the air dynamics (solid lines) with $m_{TRK} = 2.0$ [kg].

3.3.3 ストロークを最大限に活用する設計方法

続いて、ピストンのストローク長を最大化する設計パラメタの選択について説明する。前述した設計パラメタ (Fig.3.26) を用いて、リンク長を以下のように表した。

$$l_{LNK} = \left(\left(l_{CDR} + l_{OUT} + a_{RDC} + c_{OUT} \cos \theta_{RDC} - (-l_{PLY} - a_{PLY} + c_{PLY} \cos \theta_{PLY}) \right)^2 + \left(-l_{OUT} + c_{OUT} \sin \theta_{RDC} - ((-l_{PLY}) + c_{PLY} \sin \theta_{PLY}) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.44)$$

Fig.3.28 Length of cylinder tube decreased as l_{MA} increased.

ここで、 $c_{OUT} = l_{OUT} + a_{RDC} + l_{MA} + a_{MA}$ 、 $c_{PLY} = l_{PLY} + a_{PLY} + l_{MA} + a_{MA}$ とした。図中の角度は以下の式で計算される。 $\theta_{PLY} = \pi/2 + \arccos(l_{PLY}/(l_{PLY} + a_{PLY} + l_{MA} + a_{MA}))$ 、 $\theta_{RDC} = \arccos(l_{MA} + A_{MA} - l_{OUT} - A_{OUT})/(l_{OUT} + A_{OUT} + l_{MA} + A_{MA})$ 。実機の寸法に従い、各パラメタを以下のように設定した。 $\tilde{l}_{MA} = 50$ [mm]、 $\tilde{a}_{MA} = 5$ [mm]、 $l_{PLY} = 10$ [mm]、 $a_{PLY} = 3$ [mm]、 $l_{OUT} = 15$ [mm]、 $a_{RDC} = 5$ [mm]。リンク長 l_{LNK} を 200 mm から 350 mm まで 5 mm 刻みで変化させ、モーメントアーム l_{MA} を 20 mm から 50 mm まで 2 mm 刻みで変化させた。ピストンのストローク l_{STK} は、シリンダチューブの長さ l_{CDR} に伴って増加するため、シリンダチューブの長さ l_{CDR} を所与のリンク長 l_{LNK} から (3.44) にしたがって導出した。

解析結果について以下に述べる。モーメントアームが大きくなるにつれてシリンダチューブの長さは減少した (Fig.3.28)。このことから、関節可動域を満たした上でモーメントアームを最小化することで、コンパクトな設計が可能になると分かった。

3.3.4 オリフィス径が運動速度に与える効果

前述した実験では、給気側のオリフィス径と排気側のオリフィス径は同一とした。この実験において、運動性能を最大化するシリンダ内径がオリフィス径から決定されることを示した。しかし、給気側と排気側で異なるオリフィス径を備えた場合の影響については調べられていない。そのため本項では、これらのオリフィス径が運動性能に与える効果、および運動性能を最大化するシリンダの内径について述べる。

実験方法について述べる。実験では、設計パラメタ、および運用圧力が異なるシリンダに、最大速度で給気した時のピストンチューブの運動をシミュレーションし、オリフィス径が運動に与える効果を調べた。以下のようにシリンダの運動方程式を与えた。

$$m\ddot{x} = f_{\text{WIRE}} - c_v\dot{x} \quad (3.45)$$

ここで、それぞれ m はシリンダが牽引する物体の質量、 f はピストンがワイヤに与える張力、 c_v は粘性摩擦係数、 x はシリンダの位置、 \dot{x} はシリンダの速度である。他の実験においてオリフィス径と運動との関係に与える影響がほとんど見られなかったため、摩擦は省略した。粘性摩擦係数は、終端の平衡速度が生じる値を試行錯誤によって決定して用いた。タイムステップを 0.1 ms に設定し、MATLAB2015b を用いて動力学計算を行い、ピストンの運動をシミュレーションした。空気系の動力学計算には前述した実験と同様の方法を用いた。

変数として、ピストンストローク l_{STK} 、牽引する物体の重量 m 、ピストン内径 d_{PST} 、給気側のオリフィス径 d_{O1} 、および排気側のオリフィス径 d_{O2} をそれぞれ設定した。これらの変数を与えられた場合のピストンの運動をシミュレーションし、運動ごとの終端速度を収集した。給気圧力は 9 気圧 、目標圧力を 9 気圧 に設定した。

実験結果について述べる (Fig.3.29)。図は、物体質量、ストローク長がそれぞれ $m = 6 \text{ [kg]}$ 、 $l_{\text{STK}} = 150 \text{ [mm]}$ の時の異なるオリフィス径、シリンダ内径を与えられた場合における終端速度を表している。図から、排気側のオリフィス径が小さい場合には、給気側のオリフィス径によって最大速度、および最大速度を生成するシリンダ内径がほとんど変化しないことが分かる。加えて、排気側のオリフィス径が十分大きく、給気側のオリフィス径が大きい場合には、給気側のオリフィス径が大きくなるほど同一の排気側オリフィス径に対する最大速度は小さくなり、最大速度を生じるシリンダ内径が小さくなる事が分かる。

次に、特定のオリフィス径を与えられた場合において最大の速度を生じるシリンダ内径について述べる (Fig.3.30)。図は、それぞれ $m = 6 \text{ [kg]}$ 、 $l_{\text{STK}} = 150 \text{ [mm]}$ の物体質量、ストローク長が与えられ、異なるオリフィス径が与えられた場合において最大速度を生じるシリンダ内径 $d_{\text{OPT-PSN}}$ を表している。図から、前出したように、排気側のオリフィス径が小さい場合、大きい給気側のオリフィス径を用いることで速度を最大化するシリンダ内径は増加しないことが分かる。この傾向は、最大速度にも同様に見られた。すなわち、十分に大きいオリフィス径を備えた排気経路がない場合、終

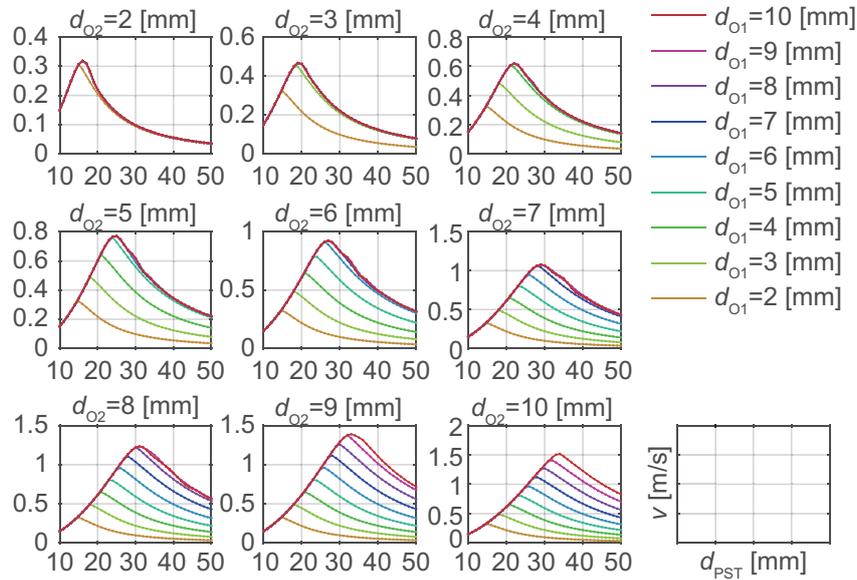


Fig.3.29 Piston velocity at the end of motion.

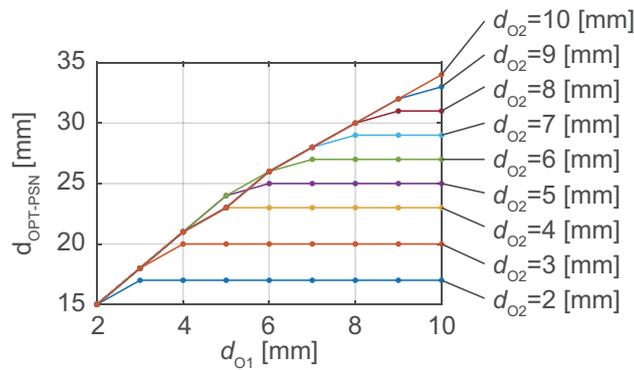


Fig.3.30 Orifice maximizing motion velocity.

端速度は給気のオリフィス径によって最大化できないことが示された。以上の実験から、給気側だけでなく排気側のオリフィス径を考慮することが、所与の設計パラメタに対して空気圧駆動系の運動性能を最大化するために重要であることが示された。

3.4 提案駆動機構を備えたロボットの開発

提案した空気圧駆動系によって跳躍打撃動作を行うロボットが設計できること確認するため、この駆動系を備えたロボットを開発した。

3.4.1 ロボット四肢の開発

SIPC シリンダを備えたロボット四肢の開発、および設計の妥当性を検証するためのダイナミック動作性能評価実験を行った。

腕の最大運動速度について調べるため、SIPC シリンダを備えたロボットアームを開発した (Fig.3.31)。ロボットアームは肩、肘、手首の3関節と体幹、上腕、前腕、手の4リンクで構成される。各関節軸は互いに平行に配置されており、ロボットアームは矢状面上を運動する。SIPC シリンダを備えた腕運動速度の性能評価を行う試験機の最も単純な形態として、この形態を採用した。肩を駆動する SIPC シリンダには内径 32 mm のシリンダチューブを、肘および手首を駆動する SIPC シリンダには内径 25 mm のシリンダチューブをそれぞれ選択した。上腕、前腕、手の長さはそれぞれ、250, 200, 130 mm である。固定台を除く重量は 2.9 kg であり、全身に搭載可能な軽量性を備えている。加えて、即応的全身ダイナミック運動における脚移動に必要なとされる大加速度を生成できるかについて確認するため、SIPC シリンダを備えたロボット脚を開発した (Fig.3.31)。ロボット脚は腰、膝、足首の3関節と体幹、大腿、下腿、足の4リンクから構成される。ロボット脚の重量は 4.72 kg、大きさは $200 \times 200 \times 1200$ ($W \times D \times H$) [mm]、大腿と下腿のリンク長は 250 mm、足の面積は $200 \times 200 \times (W \times D)$ [mm] であり、SIPC シリンダには内径 40 mm のものを利用した。ロボット脚の設計パラメタの決定は、以下の手順で行った。まず、所与のパラメタとして重量やリンク長などを決定した。具体的には、ロボット全体の重量を 5.0 kg、体幹重量を 3.5 kg、大腿と下腿のリンク長 l_{LNK} を 250 mm、バルブの有効断面積を 57 mm^2 、供給圧力を 0.6 MPa (ゲージ圧) として設定した。次に、前述したシミュレーションを行い、最大速度を生み出す設計パラメタを探索した。このシミュレーション結果に加えて、市販されている入手性の高いシリンダ径、組立の難易度などを考慮して、シリンダ内径 $D_{IN} = 40$ [mm]、トルクー張力比 $\tilde{l}_{MA} = 50$ [mm]、モー

メントアーム $l_{MA} = 20$ [mm] を設計パラメタとして選択した。

開発したロボットアームおよびロボット脚の仕様について述べる (Table 3.8)。これらのロボットは4つのアルミニウムタンクを搭載しており、タンク内および外部からの圧縮空気で駆動される。運動指令として、ロボットの中央演算処理装置 (Central processing unit) から圧力比例制御弁へと目標圧力値が送られ、制御弁はシリンダチャンバが目標圧力値に達するように供給圧力と空気排出を制御する。ロボットアームおよびロボット脚は4つの圧力比例制御弁を備えている。ロボットアームのシリンダチャンバのうち、肩を挙上し、肘を進展し、手首を伸展させる方向にピストン推力を生み出すチャンバが同一のバルブに接続し、残りのチャンバはそれぞれ1つのバルブに接続した。ロボット脚のシリンダチャンバのうち、腰、膝および、足首を屈曲する方向にピストン推力を生み出すチャンバが同一のバルブに接続し、残りのチャンバはそれぞれ1つのバルブに接続した。バルブの数を減らし、ロボットを軽量化するために、これらのチャンバとバルブの配管を採用した。制御と運動解析のために、ロボットアームおよびロボット脚の各関節にはポテンシオメータを搭載し、バルブとチャンバの間には圧力センサを搭載した。加えて、ロボット脚は体幹に姿勢、加速度センサを備え、足にはトルク力センサを備えている。ロボット腕の機構、バルブ、センサ、センサケーブル、空気チューブの合計重量 2.9 kg であり、電装系はよりコンパクトに設計できるため、全身ロボットに搭載できる。

開発したロボットアームが短時間で高速に達することを確認するための振り上げ動作実験について以下に述べる。振り上げ動作実験では、タンク内の圧縮空気の気圧を 0.7 MPa (ゲージ圧) に設定し、肩、肘、手首を屈曲させるチャンバの目標圧力をそれぞれ 0.5, 0.3, 0.03 MPa に設定し、その他のチャンバの目標圧力を 0 MPa に設定した。初期状態において、全てのチャンバ内圧は大気圧 p_{RM} と同じであり、アームの初期姿勢は Fig. 3.31 の姿勢とした。

振り上げ動作において、0.25 s の間に肩関節は 1.4 rad の変位を示した (Fig. 3.32)。終端 0.05 s の肩の平均角速度は 15.5 rad/s であった。ロボットのリンク長と関節角度から推定した動作開始から $t = 0.25$ s 後の手先先端速度は 5.87 m/s であった。この速度は、前述した跳躍打撃動作に必要な手先速度 1 m/s よりも大きい。このため、振り上げ実験で得られた結果から、開発したロボットアームが短時間で高速に達する性能を十分に備えていると結論づけた。

続いて、開発したロボット脚を用いた跳躍動作実験を行った。初期状態として、ロ

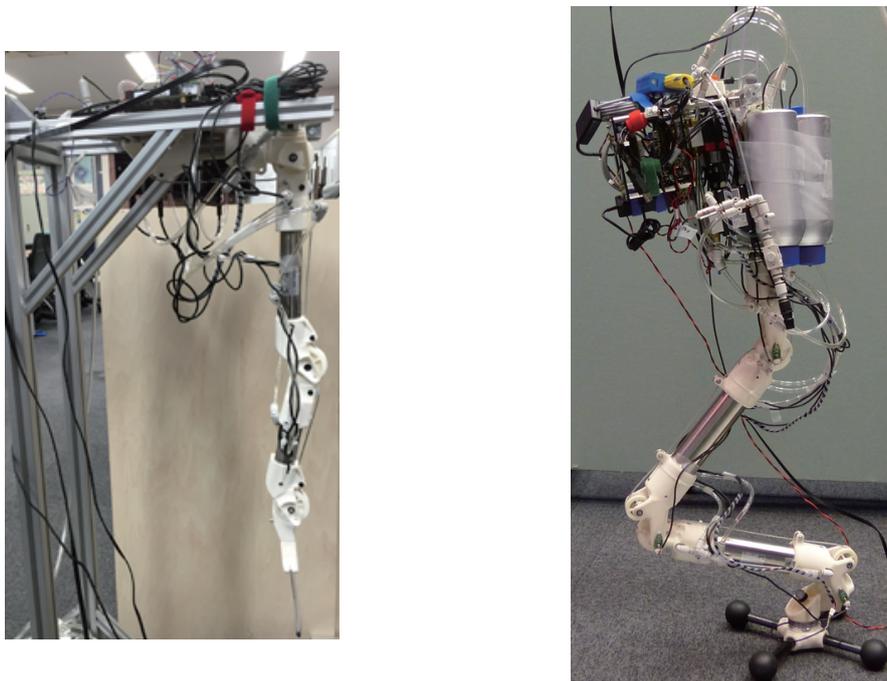


Fig.3.31 Appearance of the robotic arm (left) and the robotic leg (right).

ロボットをフォースプレート上に設置した。加えて、初期姿勢を取らせるために天井から伸びたクレーンから紐でロボットに張力を与えた。タンク内の圧縮空気はゲージ圧 0.8 MPa に設定し、運動指令は試行錯誤的に決定した。跳躍前半の運動指令として、脚を伸展させるチャンバに接続されたバルブには 0.55 MPa の一定値を送り、脚を伸展させるチャンバに接続されたバルブには 0 MPa を送った。跳躍後半の運動指令として、脚を伸展させるチャンバに接続されたバルブには 0 MPa の一定値を送り、脚を伸展させるチャンバに接続されたバルブには 0.4 MPa を送った。ロボットの運動を光学式モーションキャプチャを用いて計測し（サンプル周期： 120-Hz ，VICON），床反力を 1560 Hz で計測した。

実験では、ロボット脚による跳躍動作が見られた（Fig.3.34）。ここで、ロボットの床反力（Fig.3.35）が跳躍前の 1.2 倍になった時刻を、連続写真中の時刻 $t = 0$ とした。ノイズ除去のため床反力には窓幅 36 ms の移動平均フィルタを加えた。連続写真から、ロボットが離陸する時に紐がたるんでいることが見て取れる。ここから、跳躍動作中に紐はほとんど張力を与えていないと推測される。床反力 z 成分の最大値

Table3.8 Specification of the robotic limbs.

Actuator	Structure-integrated pneumatic cable cylinders
Valve	Tecno basic (Hoerbiger)
Potentiometer	SV01 (Murata Manufacturing Co., Ltd.)
Pressure sensor	PSE530 (SMC Inc.)
Accelometer	MTx-28A33G25 (Xsens technologies)
Force and torque sensor	FT sensor
Air supply	Aluminum tanks (500 ml), External tanks

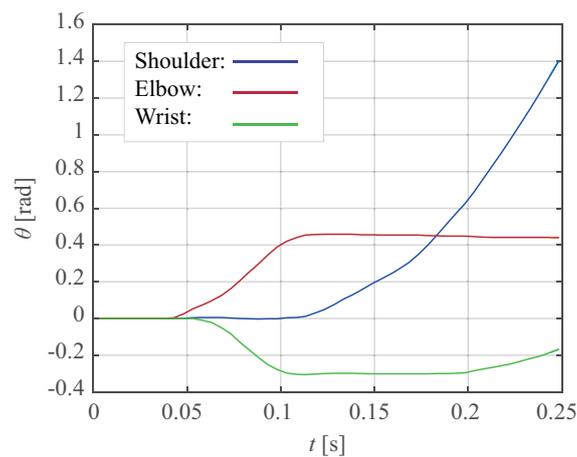


Fig.3.32 Displacement of joint angle of the robot arm. Displacement of shoulder angle was 1.40 rad when $t = 0.25$ [s].

F_z は 97.4 N であった。跳躍における体幹の速度 (Fig.3.33) は, x 成分の最大値が 1.7 m/s, z 成分の最大値が 2.1 m/s であった。この速度は, 計測した上部左右のマーカと腰のマーカの重心位置の差分から計算した。これは, 前述した要求仕様の跳躍時刻における上方への最大速度 2.0 m/s 以上であり, 前方への速度は前掲したヒストグ

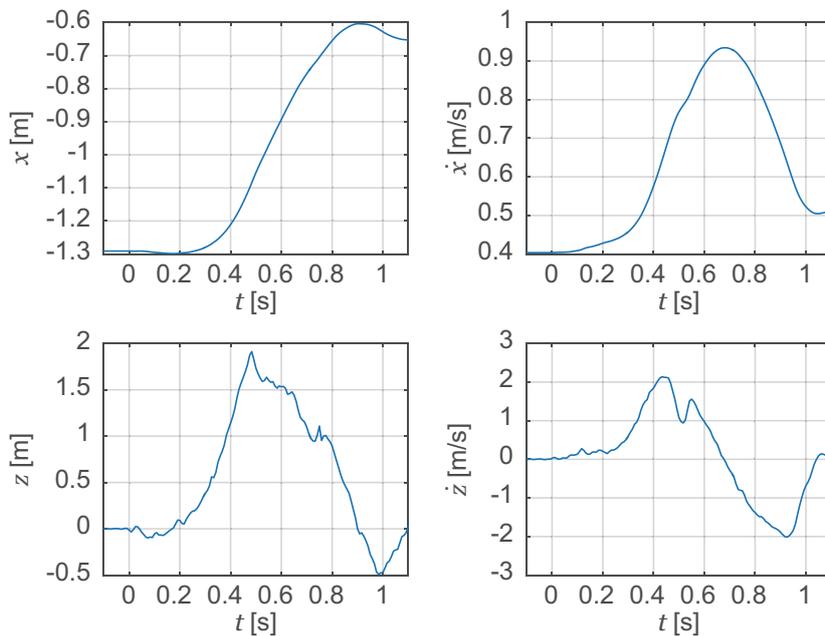


Fig.3.33 Position and Velocity of center of trunk of a robot.

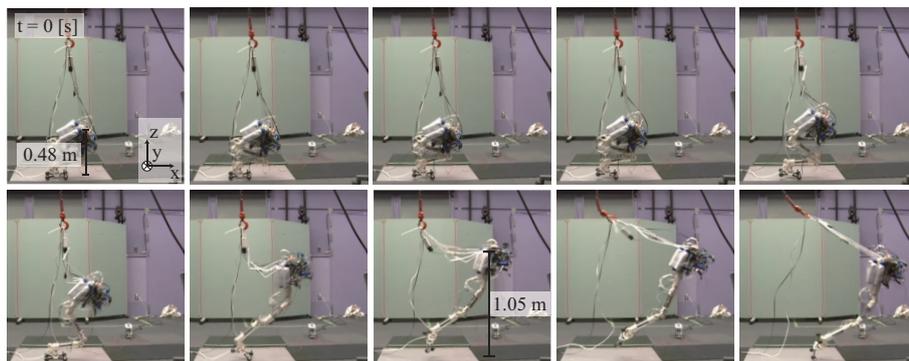


Fig.3.34 Snapshots of jumping motion. Time interval is 0.1 s. Height of a marker on the top of the robot is 0.48m at initial state. The peak of the height of the marker is 1.05m.

ラムの中に位置する (Fig.3.16). このため, 運動指令を適切に入力することで, シミュレーションと同様の範囲で打撃が可能であると考えた. 以上の結果から, SIPC シリンダを備えたロボット脚が即応的全身ダイナミック動作を行うのに十分な性能を備えていると結論した.

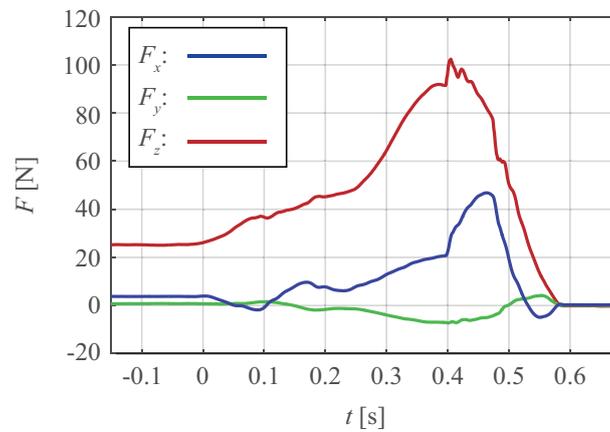


Fig.3.35 Ground reaction force of jumping of a one-leg robot. Time and coordinates correspond to that in Fig.3.34.

3.4.2 全身ロボットの開発

SIPC を搭載した四肢を二脚双腕のロボットに実装した場合の、自由度構成、重量、およびシステム構成について検討するため、これらを有する全身ロボットを開発した。ロボットは技術的要素を統合したシステムであるため、各要素を個別に検討し、統合するだけでなく、システム全体を統合して初めて発見できることがあると考え、この開発を行った。

まず、開発した 2 脚 2 腕ロボットの概要について述べる。ロボットは 2 本の腕と 2 本の脚を備えており、足首から肘までが SIPC シリンダで接続された構造をもつ (Fig.3.36)。全長は 1.2m、重量 23.4kg であり、人間大の他の代表的なヒューマノイドと比較して軽量、小型であるが、この重量は設計目標の 15 kg を超過した。理由として、ナイロン部材の重量、フレーム、センサケーブル、空送チューブなど、シリンダチューブ、バルブなど大きな重量比率を占める部分以外での重量が、予想よりも大きくなったことが挙げられる。背面部には、バルブと基板を搭載しており、腹部にあるアルミタンクに給気した圧縮空気によって自律できる。メンテナンス性の向上を期待したため、制御系をバックパックに集中させた。結果として、重量バランスが後方に偏り、効果的な力の発揮が困難であった。

次に、ロボットの機構系について述べる。ロボットは、腰にロールとピッチの 2 自

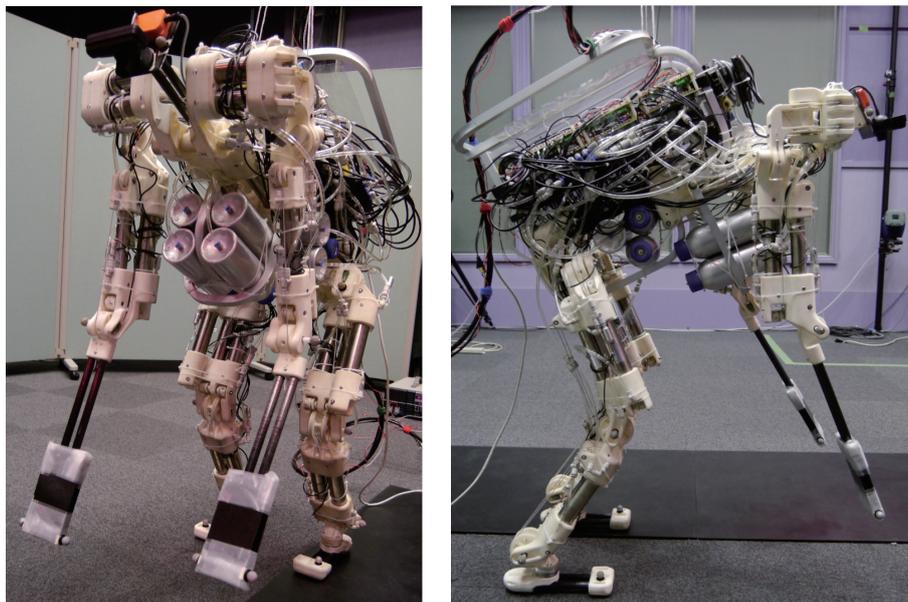


Fig.3.36 Appearance of a robot with two arms and two legs.

由度，膝1自由度，足首1自由度，肩3自由度，肘1自由度全部で16の関節自由度を備えている (Fig.3.37)。肩の3つの回転軸は一点で交わるように設計した。前述したように各関節はSIPCシリンダで接続されており，腰のピッチ軸を駆動するシリンダと肩のピッチ軸を駆動するシリンダは回転関節に接続されない側が互いにナイロン部材で接続されている。腕と比較して脚はより大きなトルクを必要とするため，内径32mmのSIPCシリンダを並列に搭載している。手先効果器は搭載していないが，付属，拡張可能な構成となっている。ロボットは手先効果器の代わりに炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced-carbon Plastics, CFRP) を材料とする前腕を有しており，打撃などのダイナミック運動が可能である。ロボットは十分な関節可動域を備えており，多様な運動が可能である (Table3.9)。

続いて，ロボットの電装系および空送系について述べる (Table3.10)。ロボットのCPUには，OSを搭載でき，1GHzのプロセッサを備える軽量で安価なシングルボードコンピュータ BeagleBone Black (beagleboard) を用いた。センサとして，圧力センサ，ポテンショメータ，カメラ，姿勢センサ，トルク力センサを備えている。即応的全身ダイナミックロボットの視覚系には，高速な情報伝達速度が要求される。このため，カメラとして最大120fpsでの映像取得が可能であり，軽量，安価なPlayStation

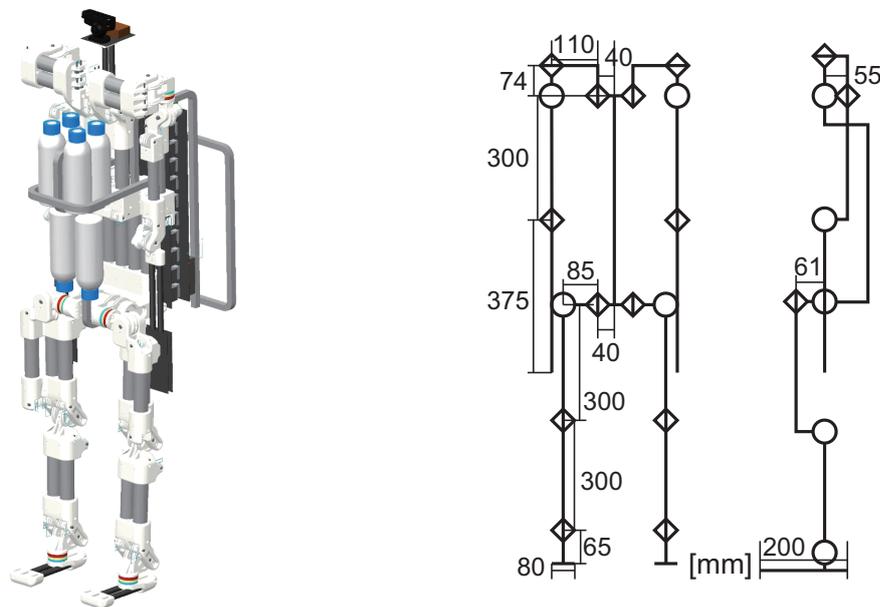


Fig.3.37 Dimensions and joint composition of a robot with two arms and two legs.

eye を選択した。ロボットのアクチュエータである SIPC シリンダは圧力比例制御弁からの圧縮空気供給によって駆動される。ロボットは圧力比例制御弁を備えているため、シリンダ内圧を圧力制御できる。

最後に、開発したロボットを用いた打撃実験について述べる。スイング速度は前述したように評価を行ったが、実際のボールを打撃可能かは分かっていなかった。このため、飛来するボールを打撃させ、打撃によって実際にボールを打ち返せることを確認した。実験では、事前に決定された運動指令に基づいて、ロボットが打撃動作を行った。ロボットは紐により固定し、左肩ピッチ軸屈曲側のチャンバに 0.2 MPa を目標指令として給気した。ロボットの動作タイミングを知る実験者がボールを投擲し、ボールの軌道をカメラで計測した。結果、ロボットはボールを打撃し、実際のボールと開発された身体で、打撃を行えることが示された (Fig.3.38)。

Table3.9 Range of motion of the robot [rad].

Joint	min	max	min (req.)	max (req.)
Right hip (pitch)	-2.429	0.252	-2.356	0
Right hip (roll)	-1.917	0.388	-1.047	0.5236
Right knee	-0.069	2.444	0	2.094
Right ankle	0.635	1.718	-0.524	0.524
Left hip (pitch)	-2.124	0.151	-2.356	0
Left hip (roll)	-0.096	2.326	-0.5236	1.047
Left knee	0.039	2.27	0	2.094
Left ankle	-0.826	1.606	-0.524	0.524
Right shoulder (pitch)	-2.609	-0.316	-2.356	0
Right shoulder (yaw)	-1.628	0.729	-1.571	0.7854
Right shoulder (roll)	-1.86	0.083	-1.571	0
Right elbow	-2.756	0.239	-2.3562	0
Left shoulder (pitch)	-2.436	-0.239	-2.356	0
Left shoulder (yaw)	-0.845	1.45	-0.7854	1.571
Left shoulder (roll)	-0.148	1.114	0	1.571
Left elbow	-2.848	-0.001	-2.3562	0

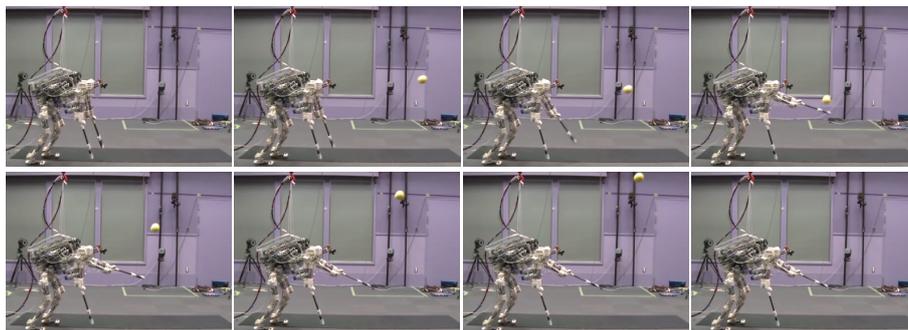


Fig.3.38 Snapshots of hit motion of the robot with its left arm.

Table3.10 Specification of the humanoid robots.

CPU	BeagleBone Balck (Rev.c, BeagleBoard.org)
Actuator	Wire cylinder
Camera	Playstation eye (SONY)
Potentiometer	SV01 (Murata Co., Ltd.)
Pressure sensor	PSE-530 (SMC)
Attitude Heading Reference System	3DM-GX
Propotional electrical valve	Tecno-basic
Air supply	Tank, external
Material	CFRP, Nyron
Power supply	Lithium-ion battery, external

第4章

空気圧ロボットが行う即応的動作の生成法と調節法

空気圧アクチュエータは電磁モータと比較して応答性が低いため、計画した軌道を厳密に追従することは困難である。一方、空気圧アクチュエータの利点として、既に圧縮された空気を蓄えている場合、重量あたり大きな出力を発生できることが挙げられる。そこで本研究では、空気圧シリンダの内圧を圧力比例制御弁で制御し、目標圧力は時間に対して一定にし、その圧力値と切り替えタイミングの選択によって動作を学習する。この動作生成において、ロボットは初期姿勢および圧力値の組み合わせから生じる状態変化を学習する。加えてロボットは、運動中に目標圧力指令の切り替えタイミングを変えることで運動を調節し、誤差を補償する。本章では、これらの生成法と調節法、それらを評価する基礎的な実験、および結果について述べる。

4.1 空気圧ロボットの過渡的ダイナミック動作学習

高い速度や大きい距離の移動を短い時間で動作を完了する必要がある場合、ロボットは自身の備える身体能力を最大限に発揮して即応的全身ダイナミック動作を行う必要がある。このような最大出力で行う運動として、一定の最大出力を用いて運動時間を最小化する制御として Bang-Bang 制御が知られている。同様に、空気圧ロボットが最大出力で運動する場合にも、一定の目標圧力を与えて最大流量で内圧を変化させり運動生成は有効であると考えられる。このため本研究では、空気圧ロボットの一定

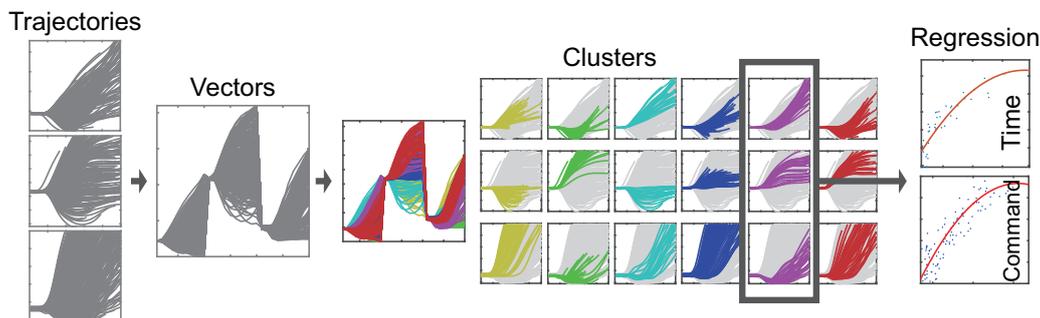


Fig.4.1 Proposed learning method.

の目標圧力と最大流量を伴う運動を学習する手法を提案した。

4.1.1 軌道分類を用いた状態遷移学習

本研究では、空気圧ロボットが一定の圧力指令を受けて過渡的なダイナミック動作を行った経験、実機で学習した限定的な運動経験から、所望の位置と速度を充足するための運動指令およびその指令で運動した時に所望の状態に到達するまでの時間を計算する問題に取り組んだ。この問題を解決するために提案した手法を説明する。

まず、運動の学習方法について述べる (Fig.4.1)。はじめに、学習において運動指令をランダムに試し、状態の時系列変化を計測、記録する。ここで運動は、一定時間が経過するか、いずれかの関節が可動限界角度に接近した場合に終了することとした。次に、各運動における状態の時系列変化を以下のような1つのベクトルで表現する。

$$\mathbf{v} = [q_1(t_1), q_1(t_2), \dots, q_1(t_M), \dots, q_N(t_M)]^T \quad (4.1)$$

ここで、 $q_i (i = 1, \dots, N)$ は、ロボットの状態を表す N 次元変数 $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_N]^T$ の各要素であり、 $t_j (j = 1, \dots, M)$ は、動作開始から動作終了時刻 t_f までの時刻を M 等分した時刻であり、 $t_j = t_f(j/M)$ である。続いて、ベクトル間の距離から計算した類似度に基づいてクラスタリングを行い、分類器を作成し、クラスごとに回帰器を作成する。

学習結果を用いて予測を行う方法について述べる。まず、所与の目標状態が、学習したどのクラスに属するかを分類器を用いて判定する。次に、目標状態が属すると

予測されたクラスタの回帰器を用いて、その状態に到達するための運動指令と、到達するまでの時間を計算する。以上が提案する手法である。

提案手法の特徴について述べる。所望の状態から、その状態へ至る運動指令と時間を逆計算するのが提案手法の特徴である。逆力学計算では、微小時間での変化において、所望の状態変化を生じるトルク／指令を計算する。これに対して、変化を生じる時間が1秒程度の長さであることが提案手法の特徴である。さらに、特定の状態に到達するようにロボットが逆力学を学習する方法と比較して、状況に即した状態に遷移すること、すなわち状況適応性が提案手法の特徴である。

提案手法では、状態の時間的な遷移を記憶、般化する。ここで、特定の状況下では、互いに近い状態から、遠い運動指令や時間が計算され、所望の状態から誤差の大きい運動指令と時間が計算されるおそれがある。これは、回帰、補間がいくつかのサンプルから分散を最小化する曲面を計算するためである。提案手法では、運動指令空間とその指令から生じる状態時空間を分割することで、互いに近い状態から、遠い運動指令や時間が計算される可能性を低減している。

本研究では、特定の初期状態からの運動を扱ったが、原理的にこの提案手法は、任意の二状態間の時間的変化とそれを生じる運動指令の組み合わせを学習する手法へと拡張できる。機械学習を用いた運動学習の研究は多いが、多様な状態遷移を逆計算できるのは提案手法の独自の点である。加えて、提案手法では軌道を分割、分類するが、状態を分類して多様な運動を学習することで、学習の効率化を行い、ロボットが行い得る運動全体への拡張が可能になると考えられる。

近年、人工ニューラルネットワークによって物体と現象を情報機械的に表現する機運が高まっている。従来人間が設計した記号によってロボットに指令する形式にとどまらず、行うべき運動を人間がロボットに与え、時にはロボット自身が判断する際に、運動の機械情動的表現はロボット自身が過去の運動や人間の運動から獲得したものになる見込みがある。提案手法はこのような形式に適合し、階層的な認識、判断の枠組みの中で、運動軌道を表象する部分として、高い制御性を備えた身体に限らず、制御性の低い身体を備えたロボット身体にも適用可能であると考えられる。以上が提案手法の特徴である。

4.1.2 空気圧腕ロボットのスイング動作学習

提案手法の有効性を示すため、まず単純モデルにおける提案手法と他の手法との比較を行った。比較のために、駆動関節 1 自由度を備えた重力下の振り子のモデルを用いてシミュレーションを行った。振り子が一定のトルクで運動した時の関節角度変化を記録、学習し、新規な目標状態に到達するための運動指令と到達にかかる時間の予測を行った。予測した運動指令で運動を行い、予測した時間後の状態と目標状態との差を求めた。訓練と試験において、トルクは $0.1\text{--}1.0[\text{N}\cdot\text{m}]$ の範囲でランダムに与えた。運動を表現するベクトルの要素数には $M = 20$ を選択した。重力定数を $g = 9.8[\text{m}/\text{s}^2]$ とし、重力は $-\pi/2$ rad の方向に働くとした。関節可動域は $-3\pi/4\text{--}\pi/6$ [rad]、関節角度限界に達しない場合の運動終了時刻を $t_f = 0.7[\text{s}]$ とした。初期状態において振り子は静止し、初期角度は $-\pi/2$ [rad] であるとした。比較では、他の手法として、(i) 所望の状態に最も接近した学習データを用いて予測する方法 (NN) (ii) 経験した状態から時間と運動指令への回帰器を作成、利用して予測する方法 (SNC)、および (iii) 経験した状態をクラスタリングし、クラスタごとに状態から時間と運動指令への回帰器を作成、利用して予測する方法 (SC)、を用いて提案手法と比較した。少ない訓練からの試験における予測精度を調べるため、10 回の訓練を行って学習した後に 500 回の試験を行って誤差の平均と標準誤差を求めた。

比較結果について以下に述べる。角度の予測誤差は、提案手法の誤差が他のどの手法の誤差よりも小さく、角速度の予測誤差は、提案手法の誤差よりも NN の誤差の方が小さかった (Fig.4.2)。具体的には、提案手法の誤差平均は 0.086 rad であり、NN の誤差平均 0.105 rad の 0.82% であった。この結果から、本研究で扱う打撃のような目標位置への誤差が小さく、目標速度の誤差が大きくとも達成可能なタスクの場合に提案手法が有効であると判断できる。

次に、提案手法が有効になる範囲について調べた。同様の実験を、訓練回数を 10 から 100 まで 10 ごとに変化させた時の、角度の誤差と角速度の誤差を NN と提案手法とで比較した。結果として、訓練回数が 30 回以下の場合には、提案手法の角度誤差がより小さく、それ以上の訓練回数の場合には、NN と変わらないか、NN の誤差がより小さかった (Fig.4.3)。角速度の誤差は、どの条件下でも NN の方が小さかった。この結果は、探索する空間に対して十分な訓練回数を得られた場合には、NN が

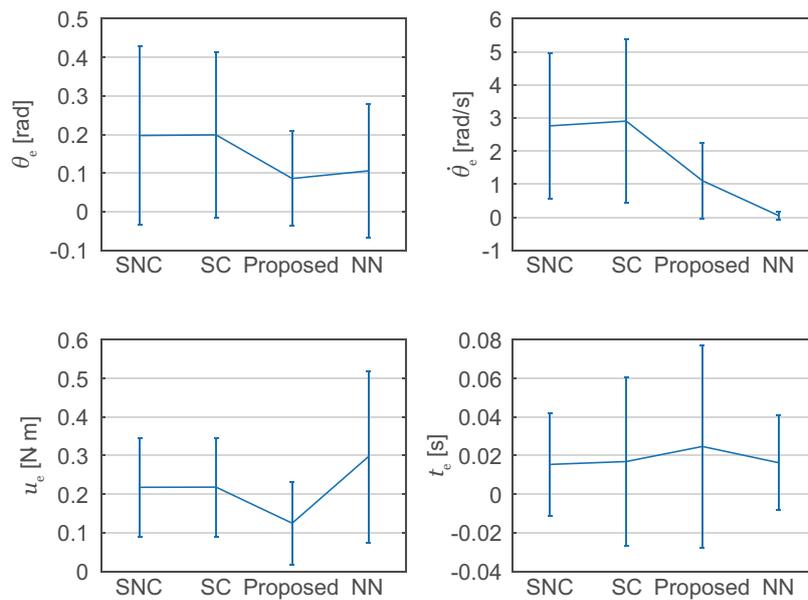


Fig.4.2 Comparison of error of prediction with four methods.

より有効であり，一方で実際の多自由度ロボットのように探索空間が大きい場合には，提案手法がより有効であることを示している。

続いて，多関節ロボットにおける提案手法の有効性を検証するため，空気圧シリンダを備えたロボットアームを用いてスイング動作の学習を行った．ロボットアームは，肩，肘，手首の3関節を備えており，平面上を運動する．運動中は圧力比例制御弁に一定の目標圧力が指令として送られ，シリンダ内の圧力が目標圧力に従うように制御される．肩，肘，および手首を屈曲させるチャンバにはそれぞれ，0.05–0.18 [MPa]，0.05–0.16 [MPa]，0.02–0.12 [MPa] の間にある圧力値をランダムに選択して指令を送り，スイング動作 (Fig.4.4) を行わせた．図において，写真の時間間隔は 0.2 s であ

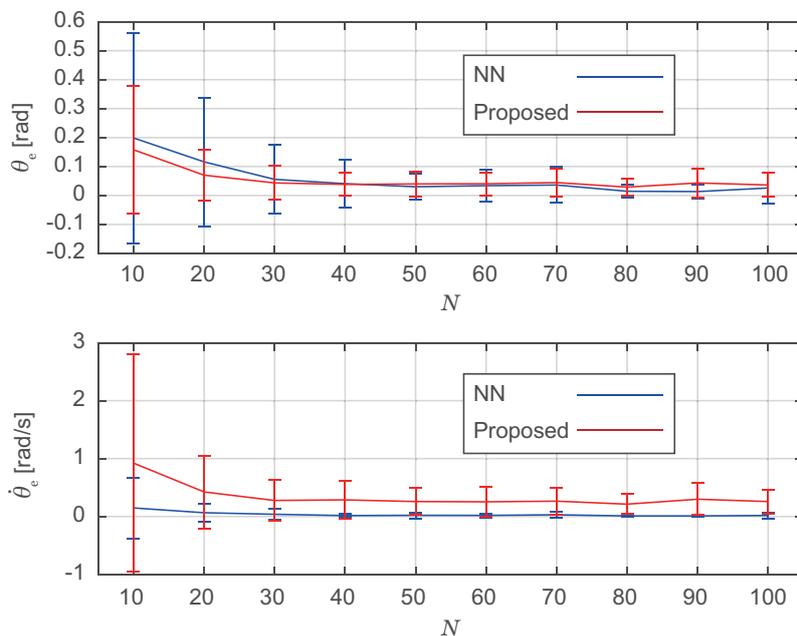


Fig.4.3 Angle error comparison. Angle error of proposed method is smaller than aother with smaller trial number than 30.

る．訓練は 100 回行い，そこでの学習結果を用いて 100 回の試験を行って誤差を評価した．クラスタ数を 6 に設定し，クラスタリングには k-medoids 法 [100] を用いた．回帰には放射基底関数（Radial Basis Function, RBF）をカーネルとする Support Vector Regression（SVR）[130] を用いた．(a) 学習データの中から目標状態に最も距離に近いものを選択する手法（NN），(b) クラスタリングを行わずに状態から時間および運動指令への回帰器を学習する手法（SVR），および (c) 提案手法（Proposed）を用いて目標状態へ到達する運動指令と到達までの時間を予測し，その時間に到達した状態と目標状態との差を比較した．

実験結果について以下に述べる．肩の角度および角速度の誤差は提案手法が最も小さく，肘の角度および角速度の誤差は NN が最も小さく，手首の角度の誤差は NN が最も小さく，手首の角速度の誤差は SVR が最も小さかった．体幹に最も近い肩は他の 2 関節と比較して手先の位置により大きな影響を及ぼす．提案手法を用いた場合，肩関節の角度誤差が最も小さかったため，実際のダイナミックな過渡的運動において，提案手法が比較した他の手法よりも有用であると考えられる．

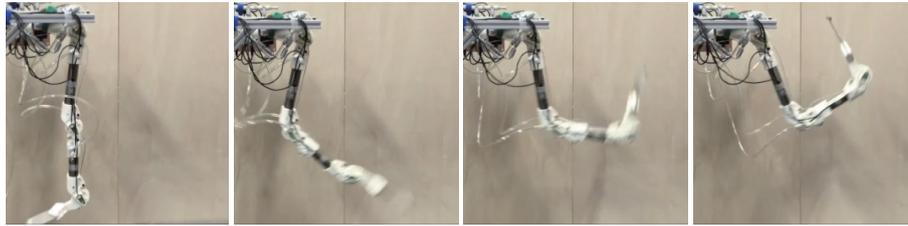


Fig.4.4 Swing of a robot arm with pneumatic cylinders.

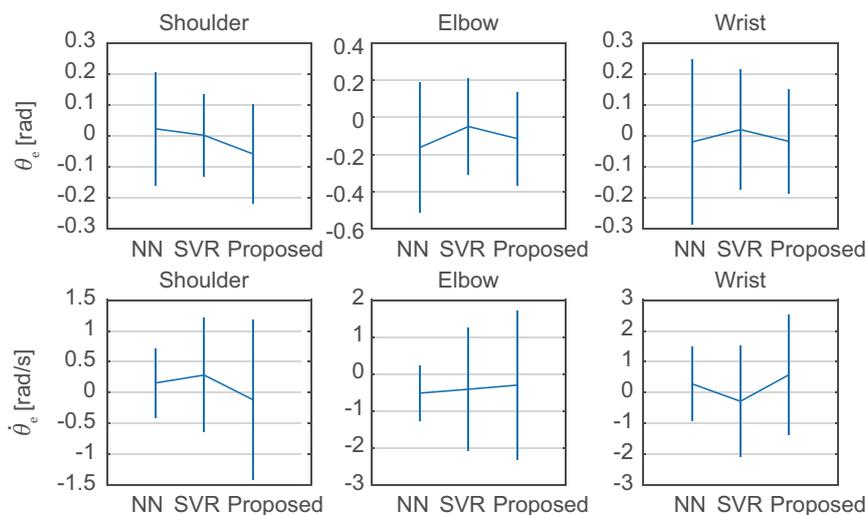


Fig.4.5 Angle and angular velocity error of swing motion.

4.1.3 多様な跳躍動作の学習

ここまで、環境に固定されたロボットの運動学習について述べた。提案手法が浮遊リンク系のロボットにも適用できることを確認するため、この手法を所望の方向への跳躍動作に適用した。実験では、動力学シミュレータ **Open Dynamics Engine (ODE)** を用いて、平面上を移動する一脚ロボットの跳躍動作をシミュレーションした。一脚ロボットのモデル (Fig.4.6) は、体幹、大腿、下腿、および足の4リンク、および腰、膝、足首の3関節を備えている。体幹、大腿、下腿、および足リンクの長さはそれぞれ 0.2, 0.3, 0.3, 0.5 m, 重量はそれぞれ 0.4, 0.8, 0.8, 3.6 kg であり、各リンクを半径 0.02 m の密度一様な円柱に近似して重心位置および慣性を与えた。

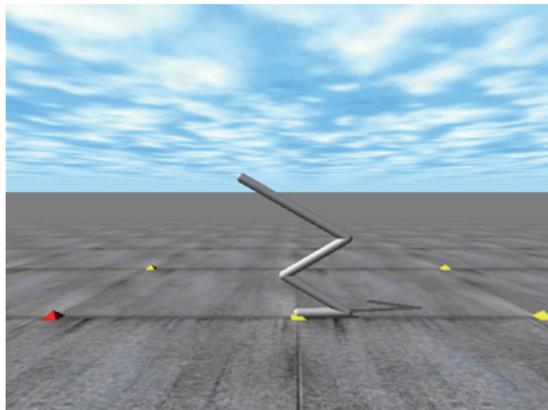


Fig.4.6 Initial posture of the robot model with one leg in simulations.

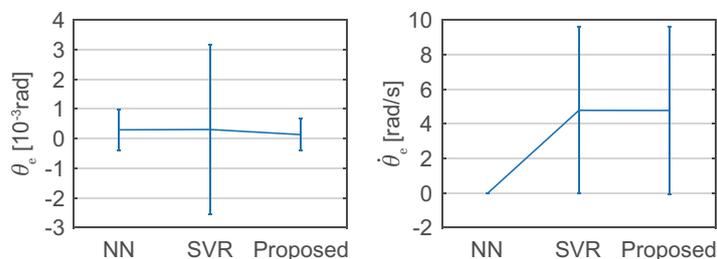


Fig.4.7 Regression error of angle and angular velocity in jumping motion.

実験では、初期姿勢として、足首、膝、および腰の関節角度を $2\pi/3$, $\pi/3$, $2\pi/3$ rad に設定し (Fig.4.6), 各関節に脚が伸展する方向へ大きさ $5\text{ N}\cdot\text{m}$ から $20\text{ N}\cdot\text{m}$ までの一定トルクをランダムに 1000 回与え、跳躍動作を計測した。運動を表すベクトル表現には、離陸に至るまでの世界座標系における足関節の傾き、および各関節の角度の時間変化を用いた。学習において、クラス数 4 で *k-mendoids* 法でクラスタリングを行い、分類器と回帰器を作成した。前述した最近傍データと状態からの直接回帰を用いて予測を行い、跳躍直前の状態との誤差の自乗和平均で比較した。

実験結果について述べる。角度誤差の自乗和平均は提案手法が最も小さく、角速度誤差の自乗和平均は NN が最も小さかった。跳躍において、離陸直前の姿勢は跳躍方向を決定づける重要な要素であり、離陸して空中で打撃等の他の動作を行う場合、離陸時刻における姿勢は重要である。このため、提案手法は跳躍打撃動作などの即応的全身ダイナミック動作に有効であると考えられる。

4.2 即応的全身ダイナミック運動のための初期姿勢生成

即応的全身ダイナミック動作においてロボットは、過渡的な運動を行い、短い時間で高い速度に到達する。このためには、状況の変化を予測するだけでなく、予測内容に応じた適切な初期姿勢を動作開始までにとること、すなわち予備動作を行うことが必要である。このため本研究では、予備動作が動作性能に与える影響を調べ、予測した内容に応じて初期姿勢をとる予備動作の生成方法を提案した。

予備動作を生成する場合、後続する動作に求められる動作で達成すべき目標や優先度を考慮する必要がある。この目標として、動作時間の最小化、外乱に対する安定性の最大化、成功確率の最大化、失敗確率の最小化、エネルギー効率の最大化、可能な動作パターン数の最大化などが挙げられる。本研究では、即応的全身ダイナミック動作において特定の状態により短い時間で到達することが、ロボットが不可逆な環境の変化に対応してタスクを成功させる上で最も重要であると考えた。このため、本研究では動作時間の最小化に着目して予備動作を分析、生成した。空気圧ロボットの初期内圧調節では、最大出力で運動した一定時間後の速度を評価関数として用いた。ここでは最大出力の運動を用いたため、速度を最大化する条件において、特定の状態に到達する時間が最小化できる見込みが高いと判断したためである。

以下の各節では、まず、予備動作がロボットによる即応的全身ダイナミック動作の性能に影響することを確認するため、予備動作において生成した身構え姿勢である初期姿勢が、即応的全身ダイナミック動作として本研究で扱う跳躍打撃動作性能に与える影響を調べた。次に、過去に行われた運動経験に基づいて動作時間を最小化する予備動作、すなわち初期姿勢を選択できることを示すため、その方法について提案した。続いて、初期状態における空気圧ロボットの内圧調節法を提案した。これは、空気圧アクチュエータは電磁モータと比較して応答性が低く、性能を最大化するには、空気圧ロボットが状態として備える内圧を初期状態において調節する必要があるためである。ここまでの内容では、動作開始においてロボットが静止することを仮定した。動作開始タイミングが完全に予測できなくとも、予備動作として運動しつつ状況変化を待つことで、性能を向上させられる可能性がある。このため最後に、周期的な運動を行う予備動作に備わる効果について検証した。

4.2.1 打撃可能領域を最大化する身構え生成法

スポーツバイオメカニクスなどを中心として、人間のダイナミック動作に先立つ身構えが後続する運動の成績に与える影響が調べられてきた。しかし、ロボットにおいて同様の効果を報告した例はほとんどない。そこで本研究では、身構え姿勢である初期姿勢が跳躍打撃動作の性能に与える影響を調べた。具体的には、跳躍打撃動作における初期姿勢が打撃可能な領域の広さ、すなわち打撃可能なボール軌道の多様さに与える影響を調べた。

方法として、前述した矢状面におけるロボットの跳躍打撃動作シミュレーションを用いた。異なる3つの初期姿勢から行う跳躍打撃動作を網羅的に探索し、網羅的に作成したボールの軌道に対して打撃に成功する動作を選択し、特定の初期姿勢からの跳躍打撃動作における打撃部位の領域を計算した。初期姿勢は、初期姿勢における重心の位置を指定し、それを満たす全身の角度を計算して決定した。初期姿勢における重心位置の x 座標を -0.025 m 、異なる初期姿勢の重心位置の z 座標をそれぞれ $0.45, 0.50, 0.55\text{ m}$ とした。

結果について述べる。異なる初期姿勢に応じた打撃における打撃部位の位置を表した図 (Fig.4.8) から、初期姿勢の重心高さが 0.5 m 、 0.6 m 、 0.4 m の順により遠い位置で打撃できることが分かる。具体的には、重心高さを備えた初期姿勢からの打撃における打撃部位位置 x 成分の最大値はそれぞれ 1.75 m 、 1.53 m 、 1.47 m であり、最も大きい距離 1.75 m は最も小さい距離 1.47 m と比較して 19% 大きい。

この結果は、矢状面における跳躍打撃動作において、適切に脚を屈曲した姿勢で動作を開始することで、動作性能が向上することを示している。垂直跳躍の場合には、関節の可動域を広く用いて力積を与えられるため、腰、膝、および足首を十分に屈曲させた姿勢が跳躍高さを最大化すると考えられる。一方、跳躍打撃動作で行う前方への跳躍では身体全体が前傾するため、脚を屈曲した場合、肩の高さが低下し、膝が前方に突き出され、腕や膝が床と衝突する可能性が高まる。このため、適切な脚の屈曲からの跳躍打撃動作が最も遠い位置での打撃を可能にしたと考えられる。

同図において、異なる初期姿勢からの打撃における打撃部位位置 x 成分の最小値が異なる、すなわち特定の初期姿勢を選択しても、近い位置から遠い位置まで全てのボールを打撃可能にはならない。ここから、予測したボール軌道に応じて初期姿勢を

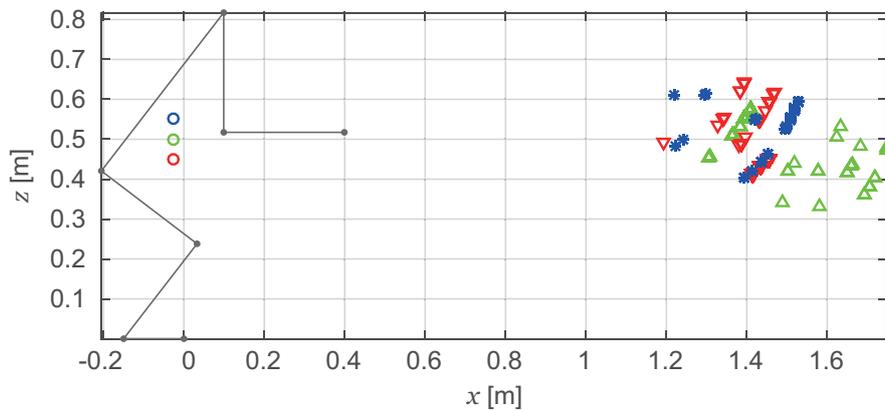


Fig.4.8 Position of a hitting parts at hitting with different initial posture.

変更すること，異なる初期姿勢からは異なる運動戦略を用いること，予測内容に適した運動戦略に応じて異なる初期姿勢をとることなどが考えられる．本研究では，予測内容に応じて初期姿勢を変更する方法とその定量的な効果について基礎的な検討を行った．

4.2.2 確率的な目標状態のための初期姿勢調節法

予測に応じて初期姿勢を変更する効果およびその方法に関する基礎的な検討について以下に述べる．

予備動作のモデル化と計算方法

ロボットが状況変化を予測し，それに応じて初期姿勢を変更するためには，予測内容，初期姿勢，および初期姿勢の変化が性能に与える影響それぞれのモデルが必要である．加えて，モデル化したそれらから取るべき初期姿勢を計算する方法が必要である．このため，本研究ではモデル化と計算方法を提案した．詳細な解析を可能にし，理解を容易にするため，環境固定の1自由度ロボットおよび2自由度ロボットを前提としてモデル化と計算方法について以下に述べるが，同様の手法を多自由度ロボットや環境非固定のロボットに拡張することも可能である．以下では，動作開始までに十分な時間があり，動作開始までに初期姿勢をとることを予備動作と呼ぶ．加えて，未

来の状況変化およびその変化に応じた目標状態を完全に予測することは不可能であると仮定し、その目標状態を「不確かな目標状態」と呼んだ。予備動作の数理的表現とその計算論的解法について以下に述べる。まず、予備動作の数理的表現について述べる。第一に、以下が予備動作の主要な特徴であるとし、これを前提に予備動作モデルを構築した。

- 予備動作は不確かな目標状態への準備である。
- 予備動作は短時間で完了する高速な運動に先立つ。

次に、不確かな目標状態のモデル化について述べる。モデル化では、目標状態の不確かさによって真の目標状態は予測不能である点に着目し、真の目標状態となりうる候補が離散的に存在することを想定した。これらの目標状態候補を目標状態群 (target states group, TSG) と呼ぶ。目標状態群を単純化するため、以下の仮定をおいた。

1. 目標状態群のそれぞれが真の目標状態となる確率は等しい
2. 目標状態群の各状態は目標状態群の平均から一定の距離以内の空間に存在する。
3. 目標状態群の各状態と目標状態群の平均との距離は一様分布に従う。

目標状態群の状態数を N_d とすると、第1の仮定から目標状態群中の1状態が真の目標状態となる確率は $P_k = 1/N_d$ である。第2, 第3の仮定を踏まえ、目標状態を以下のように定義した。

$$x_g = x_c + R\tilde{x}, \quad (4.2)$$

ここで x_c , \tilde{x} はそれぞれ分布の中心と分布の幅を表し、 R ($-1 < R < 1$) は一様乱数を表す。

最後に、予備動作の定義について述べる。第 j ($1 \leq j \leq N_d$) 番目の目標状態を $x_g(j)$, この状態が真の目標状態となる確率を P_j ($\sum_{j=1}^{N_d} P_j = 1$) と表した。加えて、予備動作が短時間で完了する高速な運動に先立つことを考慮し、予備動作後の動作時間に着目した。初期状態 x_i から目標状態 x_g に遷移する最小時間を $T(x_i, x_g)$ と表し、これを2状態間最小遷移時間 (Minimum Time for Transition between Two States, MTTTS) と呼ぶ。本研究では、第一歩として初期状態と目標状態が静止状態である時の2状態間最小遷移時間とこれに対する予備動作を扱った。最小遷移時間の期待値を以下のように

に定義した.

$$T_p(x_i) = \sum_{j=1}^{N_d} P_j \tilde{T}(x_i, x_g(j)). \quad (4.3)$$

本研究では, 2 状態間最小遷移時間を最小化する以下の初期姿勢姿勢をとることを予備動作とした.

$$\tilde{x}_i = \arg \min_{x_i} T_p(x_i). \quad (4.4)$$

予備動作の計算方法について以下に述べる. まず, 1 自由度回転アームにおける目標状態群について述べる. 初期状態および目標状態において静止する場合, 目標状態群中の状態は以下の式で表される.

$$\theta_g = \theta_c + R\tilde{\theta}, \quad (4.5)$$

ここで, θ_c と $\tilde{\theta}$ はそれぞれ分布の中心と幅である. 次に, 1 自由度回転アームにおける 2 状態間最小遷移時間の期待値について述べる. 2 状態間最小遷移時間 $\tilde{T}(\theta_i, \theta_g)$ を D 次の多項式で以下のように近似した.

$$\tilde{T}_D(\theta_i, \theta_g) = \sum_{k=0}^D a_k(\theta_g) \theta_i^k, \quad (4.6)$$

ここで, a_k ($k = 0, \dots, D$) は多項式の係数である. 加えて, この係数を以下のように近似した.

$$a_k(\theta_g) = \sum_{l=0}^D b_l(k) \theta_g^l. \quad (4.7)$$

ここで, $b_l(k)$ ($l = 0, \dots, D$) は多項式の係数である. これを用いて, T_p の近似値を以下のように計算する.

$$\tilde{T}_p(\theta_i) = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \tilde{T}_D(\theta_i, \theta_g(j)) \quad (4.8)$$

$$= \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=0}^D a_k \theta_i^k \quad (4.9)$$

$$= \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=0}^D \sum_{l=0}^D b_l(k) \theta_g(j)^l \theta_i^k \quad (4.10)$$

$$= \sum_{k=0}^D \left(\frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{l=0}^D b_l(k) \theta_g(j)^l \right) \theta_i^k. \quad (4.11)$$

これは θ_i の多項式であるため、係数 b_l から \tilde{T}_p が計算できる。同時に、所与の b_l から \tilde{T}_p を最小化する θ_i が計算できる。

続いて、2自由度アームの予備動作生成について述べる。まず、2自由度アームの目標状態群について述べる。初期状態および目標状態において静止する場合、目標状態群中の状態は以下の式で表される。

$$x_g = [v_g, w_g] \quad (4.12)$$

$$v_g = v_c + R\tilde{v}, \quad (4.13)$$

$$w_g = w_c + \tilde{R}\tilde{w}, \quad (4.14)$$

ここで、 v_c と w_c は各要素の分布の中心、 \tilde{v} と \tilde{w} は各要素の分布の幅、 \tilde{R} ($-1 < \tilde{R} < 1$) は R に独立な一様分布である。次に、2自由度アームの2状態間最小遷移時間の期待値について述べる。2状態間最小遷移時間の近似値を以下の交互作用項を持たない2次方程式で近似した。

$$\tilde{T}_2(x_i, x_g) = c_1 + c_2v_i + c_3w_i + c_4v_i^2 + c_5w_i^2, \quad (4.15)$$

ここで、 $c_m(x_g)$ ($m = 1, \dots, 5$) は係数、 $x_i = [v_i, w_i]$ は初期状態である。さらに、この係数を係数 $d_n(m)$ ($n = 1, \dots, 5$) を用いて以下のように近似した。

$$c_m(x_g) = d_1 + d_2v_g + d_3w_g + d_4v_g^2 + d_5w_g^2, \quad (4.16)$$

以上の式から2自由度アームの時も同様に、所与の d_n から2状態間最小遷移時間を計算できる。

状態間遷移時間近似の誤差が与える影響

実験設定について以下に述べる。実験では1自由度ロボットアーム (Fig.4.9) および2自由度ロボットアーム (Fig.4.10) のモデルを用いて数値解析を行い、予備動作の妥当性を検証した。計算には、MATLAB2011b (MathWorks) を用いた。

1自由度ロボットアームの運動方程式は以下である。

$$(J + Mr^2)\frac{d^2\theta}{dt^2} + Mrg \cos \theta = u, \quad (4.17)$$

ここで、 θ は関節角度、 u は関節トルク、 g は重力加速度、 J はアームの慣性モーメント、 M はアームの質量、 r はリンクの重心位置と関節との距離である。2自由度ロ

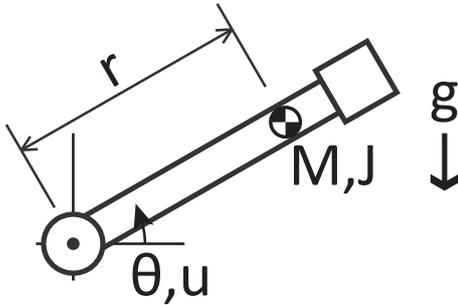


Fig.4.9 Robotic arm model with one degree of freedom: $M = 1.0[\text{kg}]$, $r = 0.5[\text{m}]$, $J = 1.0[\text{kgm}^{-2}]$, $g = 9.8[\text{ms}^{-2}]$.

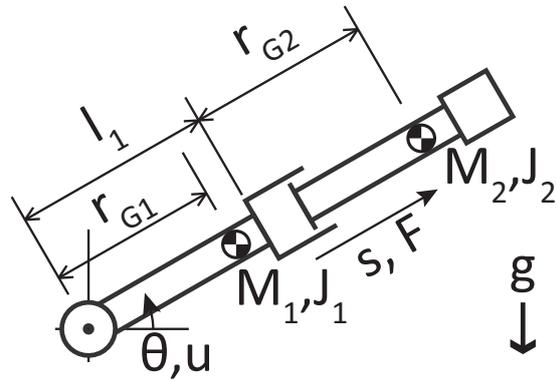


Fig.4.10 Robotic arm model with two degree of freedoms: $M_1 = 1.0[\text{kg}]$, $M_2 = 1.0[\text{kg}]$, $r_{G1} = 0.5[\text{m}]$, $r_{G2} = 0.5[\text{m}]$, $J_1 = 1.0[\text{kgm}^{-2}]$, $J_2 = 1.0[\text{kgm}^{-2}]$, $l_1 = 1.0[\text{m}]$, $g = 9.8[\text{ms}^{-2}]$.

ロボットアームの運動方程式は以下である。

$$\begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} g = \begin{bmatrix} u \\ F \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

$$J_{11} = J_1 + J_2 + M_1 r_{G1}^2 + M_2 (J_1 + r_{G2}^2), \quad (4.19)$$

$$J_{22} = M_2, \quad (4.20)$$

$$r_{G2} = s + l_1, \quad (4.21)$$

$$C_1 = 2M_2 (J_1 + r_{G2}) \dot{s} \dot{\theta}, \quad (4.22)$$

$$C_2 = -M_2 (J_1 + r_{G2}) \dot{\theta}^2, \quad (4.23)$$

$$G_1 = M_1 r_{G1} + M_2 (J_1 + r_{G2}) \cos(\theta), \quad (4.24)$$

$$G_2 = M_2 \sin(\theta), \quad (4.25)$$

ここで、添字の1および2は第1リンクおよび第2リンクを表し、 l_1 は第1リンクの長さ、 s は第2リンクの直動変位量、 F は直動力である。

続いて、2状態間最小遷移時間の計算方法について述べる。時間最小制御としてバンバン制御が用いられる。このため、切り替え時刻 t_{s1} 、最大トルク $u_{max}(>0)$ を用いて、1自由度ロボットアームの出力を以下のように決定した。

$\theta_i < \theta_g(k)$ のとき,

$$u = \begin{cases} +u_{max}, & (t < t_{s1}) \\ -u_{max}, & (t \geq t_{s1}) \end{cases} \quad (4.26)$$

$\theta_i < \theta_g(k)$ のとき,

$$u = \begin{cases} -u_{max} & (t < t_{s1}) \\ +u_{max}, & (t \geq t_{s1}) \end{cases} \quad (4.27)$$

時間最適制御において2自由度アームは、アームが縮んで伸びる運動を行う。このため、切り替え時刻 t_{s21} ($0 < t_{s21} < t_{s22}$) および t_{s22} ($< t_f$), 最大出力 $F_{max}(> 0)$ を用いて、2自由度ロボットアームの直動出力を以下のように決定した。

$$F = \begin{cases} -F_{max}, & (0 \leq t \leq t_{s21}, t_{s22} \leq t \leq t_f) \\ +F_{max}, & (t_{s21} < t < t_{s22}) \end{cases} \quad (4.28)$$

これらの切り替え時刻は、ランダム探索と山登り法を用いた目標状態の収束によって決定した。

実験では、1自由度ロボットアームのモデルを用いて2状態間遷移時間の誤差を調べた。この実験の実験設定について述べる。まず、異なる初期状態と目標状態に対して、近似係数 a_k, b_l, c_m, d_n を計算した。次に、これらの係数を用いて2状態間最小遷移時間を求めた。初期姿勢と最終姿勢をそれぞれ、 $-\pi/2$ rad から $\pi/2$ rad まで $\pi/100$ rad ごとに変更した。近似多項式の次数 D を1から20まで1ずつ変更した。これら各条件の下で、近似的な2状態間遷移時間を計算し、真の2状態間遷移時間と比較した。

実験結果について述べる。真の2状態感遷移時間マップは初期状態と最終状態の関係性に対して非対称である。これは重力の影響であると考えられる。近似誤差は初期状態と最終状態の差が大きくなるほど大きくなった (Fig.4.11)。図から、近似多項式の次数は5程度あれば領域全体の構造を捉えられるように見え、近似多項式の次数が小さい場合、2状態間最小遷移時間が小さい領域で特に誤差が大きかった。

続いて、近似誤差が運動時間に与える影響について調べた。近似誤差を評価する評価関数を設定し、この関数を用いて異なる次数における近似誤差を比較した

評価関数の計算方法について述べる。評価関数は真の2状態間最小遷移時間とその

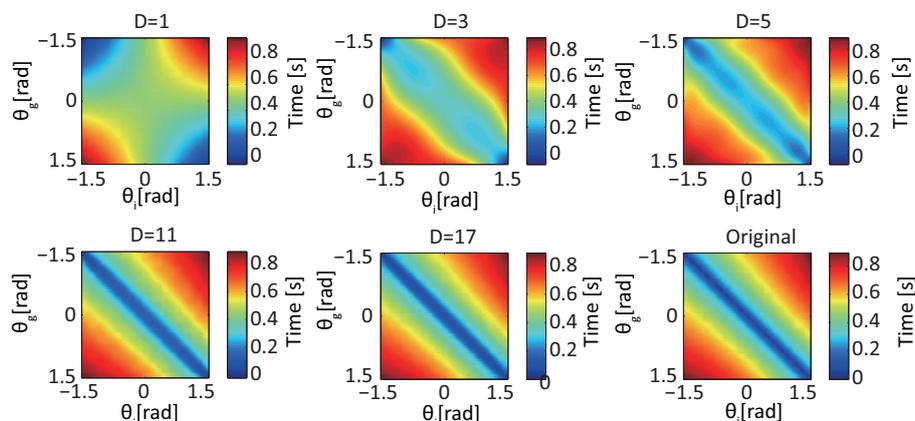


Fig.4.11 Maps of qMTTTS and approximate qMTTTS.

近似値との差から以下のように計算した.

$$E = \sum_{\theta_i = -\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sum_{\theta_g = -\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |\tilde{T}(\theta_i, \theta_g) - \tilde{T}_D(\theta_i, \theta_g)|. \quad (4.29)$$

計算では, $N_d = 100$, $\theta_c = 0[\text{rad}]$, の条件の下, $-\pi/2 \text{ rad}$ から $\pi/2 \text{ rad}$ まで $\pi/100 \text{ rad}$ ごとに変更し, D を変更して E を計算した. 加えて, 次数が 2 状態間最小遷移時間の近似値に与える影響を以下のように定義した.

$$E_d(D) = \left(\frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \tilde{T}_D(\tilde{\theta}_i(D), \theta_g) \right) / E_m, \quad (4.30)$$

$$E_m = \sum E_d(D). \quad (4.31)$$

ここで, $\tilde{\theta}_i(D)$ は次数 D を用いた近似によって生成された初期姿勢を表す. シミュレーションでは, $N_d = 10$, $\theta_c = \pi/4[\text{rad}]$, $\tilde{\theta} = \pi/4[\text{rad}]$ の条件の下, θ_g をランダムに 100 回変更して $E_d(D)$ を計算した.

実験結果について述べる. 次数が増加するにつれて近似誤差の減少が見られた (Fig.4.12). 加えて, D と E の関係式は $E = c/D$ (c : constant) の関数形だと推測される. 2 状態間最小遷移時間に近似が与える影響では, 5 次以上の次数を用いることで, 近似誤差の影響が小さくなることが示された (Fig.4.13). このため, このロボットにおいては 5 次関数で近似することで, 近似誤差の影響を十分小さくできると分かった.

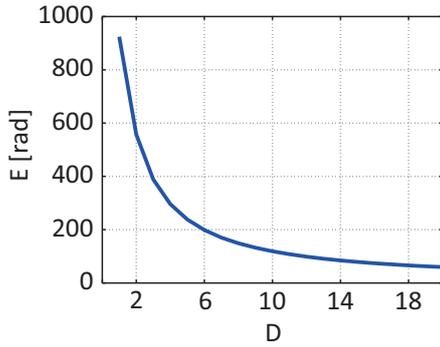


Fig.4.12 Approximate error verification.

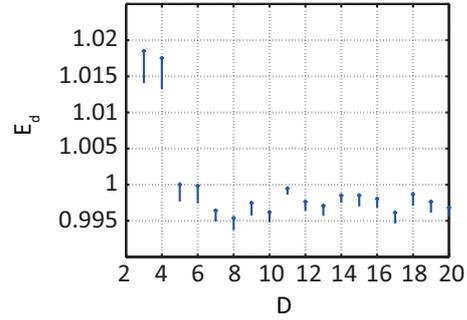


Fig.4.13 Relationship between Dimension and qMTTTS.

環境の力学的構造に関する知識が与える効果

提案した初期姿勢決定法と他の方法との比較について以下に述べる．筆者の知る限り，目標状態への遷移時間から初期状態を計算する手法はないため，他の単純な手法を試し，それと本提案手法とを比較した．他の手法では，以下のように目標状態群の期待値を初期状態とした．

$$x_d = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} x_g(j). \quad (4.32)$$

異なる目標状態群に含まれる個数に対して2状態間最小遷移時間を提案手法と他の手法で計算し，比較した．比較を表す係数を以下のように定義した．

$$E_c(N_d) = \frac{T_p(\tilde{\theta}_i(D))}{T_p(\tilde{\theta}_d(D))}, \quad (4.33)$$

$$T_p(\tilde{\theta}_i(D)) = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \tilde{T}_D(\tilde{\theta}_i(D), \theta_g) \quad (4.34)$$

$$T_p(\tilde{\theta}_d(D)) = \frac{1}{N_d} \sum_{j=1}^{N_d} \tilde{T}_D(\tilde{\theta}_d(D), \theta_g) \quad (4.35)$$

1自由度ロボットアームモデルのパラメタとして， $\tilde{\theta} = \pi/4[\text{rad}]$, $D = 17$, $\theta_c = \pi/4[\text{rad}]$ を2自由度ロボットアームモデルのパラメタとして， $\theta_c = \pi/4[\text{rad}]$, $\phi_c = 0[\text{rad}]$,

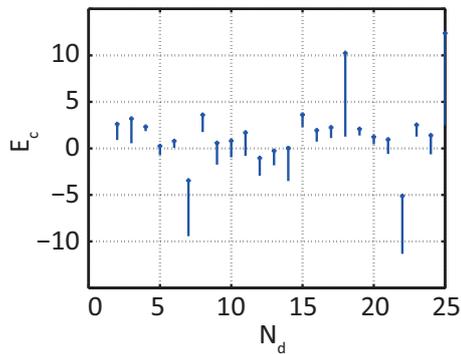


Fig.4.14 Relationship between number of states in TSG and qMTTTS with a one DOF model.

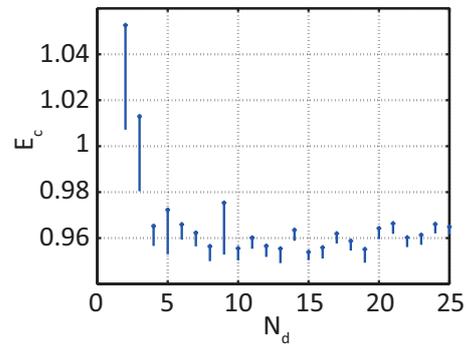


Fig.4.15 Relationship between number of states in TSG and qMTTTS with a two DOFs model.

$\tilde{s} = 0.2[\text{m}]$, $s_c = 0.8[\text{m}]$ を用いて、それぞれ 20 回の 2 状態間最小遷移時間の平均を計算した。

他の手法との比較実験の結果について述べる。1 自由度ロボットアームの場合には、目標状態群と提案手法と他の手法との関係に相関が見られなかった (Fig.4.14)。一方で、2 自由度ロボットアームの場合には、目標状態群の状態数が 4 以上の場合に、 $E_c < 1$ となり、提案手法が他の手法よりも有効に機能した (Fig.4.15)。この結果は 2 自由度アームを用いた場合には、準備動作が有効に機能する可能性を示唆している。

多自由度ロボットにおける初期姿勢調節

本項では、1 自由度および 2 自由度のロボットモデルを用いて、2 状態間最小遷移時間を収集、近似することで初期姿勢を調節する効果を検証した。時間最小制御について、現在でも活発に研究が進められて行われており、6 自由度腕ロボットやヒューマノイドロボットへ適用できる。しかし、2 状態間最小遷移時間を初期状態および最終状態に対して網羅的に収集するならば、膨大な計算時間および詳細なモデルが必要になる。この問題は将来的に計算機の発達および計算方法の発展によって解決される可能性があると考えられる。一方で、他の方法として、状態間遷移を最適化の計算なしに網羅的に行い、その全体を記憶、近似して 2 状態間遷移時間の写像を生成するという方法もある。このためには、初期状態と最終状態からその遷移時間を計算する枠組みが必要である。このような動作収集と近似の方法を本研究において提案した。これ

は本章第1節で述べた。加えて、網羅的な探索よりも効率の良い探索が求められる。効率的な学習について、強化学習に関連した研究で多くの成果が報告されている。後述する方法をこれらの知見と統合することで、効率的に状態遷移全体を把握し、多自由度ロボットにおける初期姿勢調節へと拡張できると考える。

4.2.3 空気圧ロボットの動作開始加速度を最大化する初期内圧調節法

空気圧ロボットの動作開始加速度を最大化する初期内圧調節法について述べる。

空気圧人工筋を有する単純拮抗構造の初期状態

本項では、最も単純な実験装置として1自由度のロボットアームとそのモデルを用いた。短い時間で行われる動作では、人工筋の内圧が目標圧力に達するまでの時間の長さが、長い時間で行われる動作と比較して大きくなる。内圧が目標圧力に達するまでの空気流入速度が最大関節速度の生成に大きな効果を与えられと考える。このため、流入速度が最適内圧を決定づける様式に着目した。

拮抗人工筋駆動関節の最適内圧の定義について述べる。短時間で最大の関節速度を生成する内圧を最適内圧とした。実験では、静止した空気圧人工筋拮抗駆動1自由度ロボットアームの片側の筋に最大速度で給気し、他方の筋を最大速度で排気することによる一方向への最大速度での運動を調べた。アームが運動する方向に張力を発生させ、最大速度で給気される筋を「主働筋」、主働筋と拮抗する筋を「拮抗筋」と定義した。主働筋と拮抗筋の初期圧力をそれぞれ p_{m0} , p_{a0} とし、主働筋に供給される圧力を p_{max} , 動作開始から τ 時間後の最大関節角速度を $\dot{\theta}_\tau$ とした。加えて、主働筋と拮抗筋の最適な初期圧力の組み合わせ $P_0 = [p_{m0}, p_{a0}]^T$ を以下のように定義した。

$$P_0 = \arg \max_{P_0} \dot{\theta}_\tau, \quad (4.36)$$

ここで、 $P_0 = [p_{m0}, p_{a0}]^T$ である。

初期内圧が動作開始時の速度に与える効果の網羅的検討

シミュレーション実験の実験設定について説明する。拮抗空気圧人工筋の一对の初期内圧が短時間で到達する最大角速度に与える影響を調べるため、ロボットアームモデル (Fig.4.16) を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションでは、 $p_{a0} = p_{m0}$ と設定し、主働筋の初期内圧 p_{m0} とオリフィス径 k_m を変えた。順動力学

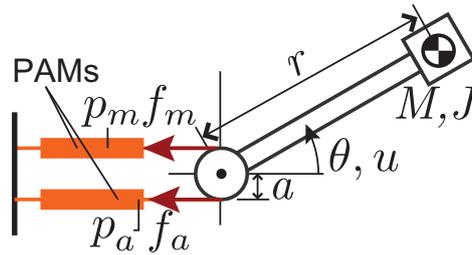


Fig.4.16 Robotic arm model used in simulations. Parameter $r(= 0.5[\text{m}])$ is length from the joint axis to the center of mass, $M(= 0.5[\text{kg}])$ is mass, $J(= 0.5[\text{kg}^2 \cdot \text{m}])$ is rotational inertia around the joint axis, θ is angle displacement of the joint, u is torque, $a(= 0.05[\text{m}])$ is moment arm around the joint axis, f_m and f_a are tension of PAMs, and p_m and p_a are pressure in PAMs, respectively.

計算を行って運動を計算し、動作開始から時間 τ 経過後の最大角加速度 $\dot{\theta}_\tau$ を求めた。人工筋の内圧の変化は、前章の動力学モデルを用いた。主働筋と拮抗筋のオリフィス径に比例する係数をそれぞれ k_m , k_a と定義した。人工筋の張力 f は、簡単のため、内圧 p および係数 K から $f = Kp$ の式を解いて求めた。係数 K は実際の McKibben 型人工筋の張力と内圧を計測して設定した。

シミュレーション実験の実験結果について述べる。主働筋の初期内圧に応じて、最大関節角速度は変化し、その変化の仕方は係数 k_m と k_a との大小関係によって変わった (Fig.4.17)。主働筋の最適初期内圧はそれぞれ、 $k_m < k_a$ の時、最大圧力、 $k_m \cong k_a$ の時、最大圧力と大気圧との間の圧力、 $k_m > k_a$ の時、大気圧と同じであった。この傾向は、 p_{\max} および τ を変更しても同様に見られた。以上の結果は、拮抗する空気圧人工筋のオリフィス径の関係が、最適な初期内圧を以下のように決定することを示している。

$$p_{m0} = \begin{cases} p_{\max} & k_m < k_a \\ p_o (0 < p_o < p_{\max}) & k_m \cong k_a \\ 0 & k_m > k_a \end{cases} . \quad (4.37)$$

実験結果が示唆する短時間で到達可能な関節角速度を最大化する最適初期内圧は以下である。(i) 主働筋の空気流入速度が拮抗筋の流出速度よりも小さい場合には、最適初期内圧は主働筋と拮抗筋を供給圧力と同じ内圧である。(ii) 主働筋の空気流入速度が拮抗筋の流出速度よりも大きい場合には、最適初期内圧は大気圧である。この理由として、上記の初期内圧だった時に、関節トルクが最大値をとるまでの時間が最小

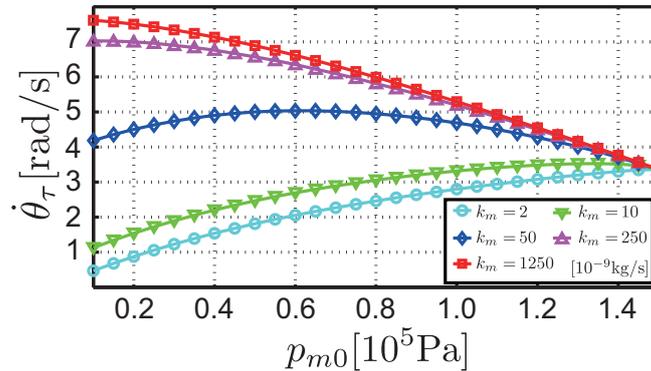


Fig.4.17 Peaks of angular velocity. Parameters are $k_a = 50 [10^{-9} \text{ kg/s}]$, $p_{\max} = 2.5 [10^5 \text{ Pa}]$, $K = 10^{-3} [\text{m}^2]$, $\dot{\theta}_0 = 0 [\text{rad/s}]$, $V_m = 1.89 [10^{-4} \text{ m}^3]$, $\dot{V}_m = 0 [\text{m}^3/\text{s}]$, $\tau = 0.2 [\text{s}]$, respectively.

化されるためであると考えられる。

シミュレーション結果の実機による実証

シミュレーションの妥当性を検証するため、実機を用いた実験を行った。実験について以下に述べる。

まず、実験設定について以下に述べる。実験には McKibben 型空気圧人工筋で拮抗駆動される 1 自由度のロボットアームを用いた (Fig.4.18)。ロボットアーム関節のモーメントアームは 22.0 mm, アームの長さは 279 mm, アームの先端の重りの重量は 265 g, 関節可動域は床と水平の角度を 0 rad として -0.72–1.45 rad. ロボットは外部から供給される圧縮空気駆動し (Fig.4.19), 1 本の人工筋の圧力は, 計算機から制御される 2 ポートのバルブ 2 つで圧力制御される (Table4.1)。

次に、実験手順について以下に述べる。実験では異なる初期内圧で拮抗させた初期状態から主働筋に給気し, 拮抗筋から排気した。このため主働筋がアームに与える力が最大, 拮抗筋が与える力が最小となり, アームは振り上げ運動を行った。人工筋への給気時間を変化させて初期状態における拮抗状態を変化させた。供給圧力はレギュレーターで 0.2 MPa に設定した。運動の角度変化を計測し, 動作開始から時間 $\tau = 0.15 [\text{s}]$ 経過後の関節角速度を計算した。人工筋への給気速度を変化させるため, 内径の異なる ($\phi 2$, $\phi 5$) 空気チューブを用いた。

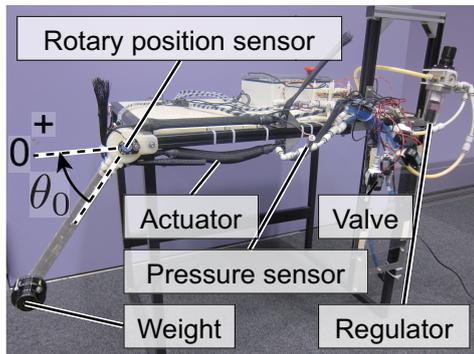


Fig.4.18 Appearance of the robot arm with PAMs.

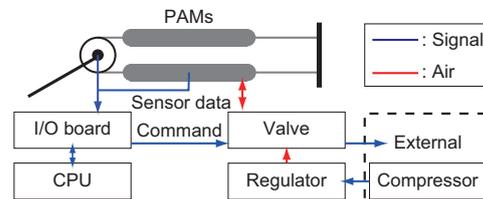


Fig.4.19 Specification of the robot arm with PAMs.

Table4.1 Specification of a One DOF PAM robot arm.

Actuators	PAMs (McKibben type)
Valves	Pilot valves (EXA-C8-02C-3; CKD Corp.)
Air compressor	SLP-221EBD; Anest Iwata (external)
Sensors	Rotary position sensors (SV01, Murata), Air pressure sensors (PSE530, SMC Corp.)
CPU board	SH-Board (Lepracaun; General Robotix Inc.)
Materials	Acrylic resin, Aluminium pipes

実験結果について以下に述べる。シミュレーションと同様に、主働筋と拮抗筋の流入速度の差によって速度を最大化する初期内圧が決定した (Fig.4.20, Fig.4.21)。すなわち、主働筋の流入速度が大きい場合には低い初期内圧で拮抗させた方が角速度が早く、主働筋の流入速度が小さい場合には高い初期内圧で拮抗させた方が角速度が早かった。角速度 $\dot{\theta}_\tau$ は初期内圧 p_{m0} と有意な相関が確認された (Fig.4.20, Pearson's coefficient $r = 0.58$, $p = 0.0022 < 0.01$, Fig.4.21, $r = -0.97$, $p = 0.0000 < 0.01$)。これらの結果から、実際に、空気圧アクチュエータの流入速度の大小が短時間での到達可能な運動速度を最大化する初期内圧を変化させることが示された。

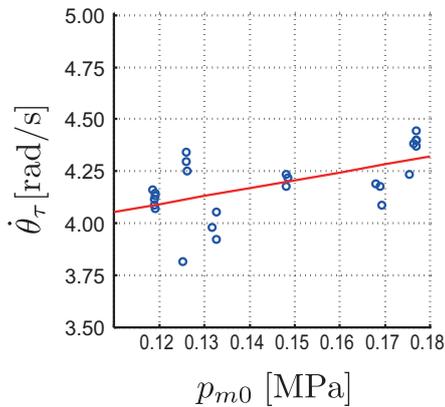


Fig.4.20 Increasing maximum angular velocity as increasing initial pressure of the main muscle with its large delay. $\dot{\theta}_0 = -0.279$ [rad]. Blue circles represent results (sample number $n = 25$) and red lines represent approximate line ($R^2 = 0.34$).

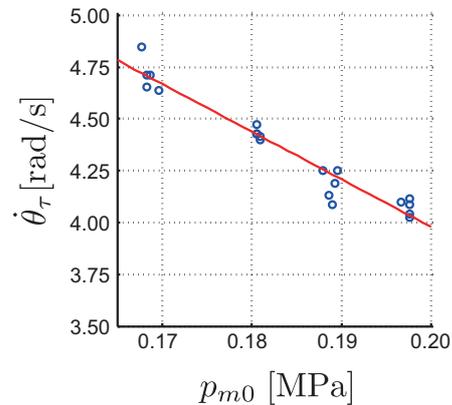


Fig.4.21 Decreasing maximum angular velocity as increasing initial pressure of the main muscle with its small delay. $\dot{\theta}_0 = -0.269$ [rad]. Blue circles represent results (sample number $n = 22$) and red lines represent approximate line ($R^2 = 0.94$).

多自由度空気圧ロボットの初期内圧調節

本項では、空気圧人工筋拮抗駆動ロボットが短時間での運動速度を最大化するための初期内圧が、主働筋と拮抗筋の流入速度の差によって変化することを確認した。この知見は即応的全身ダイナミック動作を行うロボットの性能を最大化する設計や制御への貢献が期待できる。空気圧ロボット脚は全身を加速させる大きなトルクを短時間で発生させる必要がある。このため、脚を伸展させる筋は大型化するが、本研究の結果を踏まえると、単に大きな筋を用いるのではなく、短時間で筋が十分な力を発揮できるだけの流入速度が必要であることが分かる。本研究において着目した空気流入速度は、多自由度空気圧ロボットの最大出力にも影響すると考える。すなわち、最大流量で複数のアクチュエータに圧縮空気を流入させた時に、配管の圧力が低下し、単一で駆動した場合よりも圧力増加速度が小さくなる可能性がある。このため、多自由度空気圧ロボットの出力を最大化する設計を行うために、バルブに至るまでの空気配管を考慮する必要性が示唆される。同時に、多自由度空気圧ロボットの初期内圧調節においても、複数のアクチュエータに同時に最大流量で圧縮空気を流入させる場合、短

時間で最大圧力に達するのが望ましいアクチュエータの圧力を事前に高めるなどの方法が考えられる。以上のように、本項で提案した初期内圧調節の知見は、多自由度ロボットの設計および制御に対して示唆を与える。

本項では、空気圧ロボットにおける内圧の動的変化に着目し、この変化の重要性を示唆した。前章の空気圧アクチュエータの設計ではこの知見を参考にして、内圧の動的変化を考慮して圧力上昇速度を最大化する設計方法を提案した。

4.2.4 即応ダイナミック動作待機行動に関する考察

即応的全身ダイナミック動作として本研究で扱う跳躍打撃動作では、動作開始においてロボットは静止しているものとした。しかし、ロボットが周期的な運動を行いつつ状況変化を待つ方が後続する即応的全身ダイナミック動作のパフォーマンスを高められる可能性がある。このため本節では、どのような状況変化に対して周期的な運動が即応的全身ダイナミック動作のパフォーマンスを向上させるのかについて基礎的な検討を行った。

周期的予備動作の実験設定

本項では、予備動作における周期運動と静止を比較し、予測誤差の特性に適した予備動作の種類について調べた。本項における予測困難な状況の定義、準備動作として扱う停止した初期状態と周期運動を行う初期状態の定義、および評価方法などの実験設定について以下に述べる。

はじめに、設定した実験条件について述べる。本項では予測困難な状況として、(1) 動作開始時刻が未知であり、(2) 目標状態が確率的であり、(3) 目標状態が推定からの誤差をもつ状況を考える。ここで動作開始時刻は未知であることを、動作開始時刻の確率が時間に対して一様であることと定義する。また、実験には1自由度ロボットアームのモデルを用い、目標位置 x_f が $\mathcal{N}(\mu_x, \delta_x^2)$ に目標速度 v_f が $\mathcal{N}(\mu_v, \delta_v^2)$ に従うと推測するとした、この推測した確率的目標状態を「推測確率的目標状態」と呼ぶ。そして実際には x_f が $\mathcal{N}(\mu_x + \tilde{\mu}_x, \delta_x^2)$ に v_f が $\mathcal{N}(\mu_v + \tilde{\mu}_v, \delta_v^2)$ に従うとした。ここで、 $\mathcal{N}(\mu_x, \delta_x^2)$ と $\mathcal{N}(\mu_v, \delta_v^2)$ は独立であり、 $\mathcal{N}(\mu_x + \tilde{\mu}_x, \delta_x^2)$ と $\mathcal{N}(\mu_v + \tilde{\mu}_v, \delta_v^2)$ は独立であると仮定した。以後 x は位置を、 v は速度を表す。さらに、推定した目標状態の平均と実際の目標状態の平均との誤差 $\tilde{\mu}_x$, $\tilde{\mu}_v$ を「推定平均誤差」と呼ぶ。実験では、推定平

均誤差によって準備動作を行う初期状態から目標状態への最小遷移時間期待値がどのように変化するかを調べた。

次に、準備動作として扱う2種の初期状態について説明する。1つは停止した初期状態である。本項ではこの初期状態を「停止準備状態」と呼ぶ。もう1つは周期運動を行う初期状態である。本項ではこの初期状態を「周期的準備状態」と呼ぶ。以上の定義を用いて、準備状態の評価値を次節で定義する。

比較に用いた準備動作の評価値を以下に定義する。準備動作の評価値を定義するための準備として、準備動作の評価値を計算するために用いられる停止準備状態から確率的目標状態へ遷移する期待値、および周期準備状態からのその期待値を定義する。

反応動作の速度を考慮するため、本項では任意の初期状態—目標状態1組の間を遷移する最小の時間を用いる。前述したようにこの時間を「2状態間最短遷移時間 (*Minimum Time for Transition between Two States, MTTTS*)」と呼ぶ。初期状態 (x_i, v_i) から目標状態 (x_f, v_f) への MTTTS は $T(x_i, v_i, x_f, v_f)$ と表す。

次に、停止準備状態から確率的目標状態への MTTTS およびその期待値について述べる。任意の停止した初期状態 $(x_i, 0)$ から任意の目標状態 (x_f, v_f) への MTTTS を以下のように定義する。

$$T_n = T(x_i, 0, x_f, v_f). \quad (4.38)$$

本項では、これを「停止準備状態からの2状態間最短遷移時間 (*MTTTS from Stopping initial states, MTTTS-s*)」と呼ぶ。これを用いて、停止初期状態から推定される確率的目標状態への MTTTS 期待値 E_n を以下のように定義した。

$$E_n = \sum_{j=1}^N p_j T(x_i, 0, x_f(j), v_f(j)). \quad (4.39)$$

ここで N は状態数、 p_j は j 番目の状態 $(x_f(j), v_f(j))$ ($1 \leq j \leq N$) が目標状態となると推定される確率である。加えて、以下を満たす初期位置を「推定最適初期停止位置」と呼ぶ。

$$x_o = \arg \min_{x_i} E_n. \quad (4.40)$$

この推定最適初期停止位置を用いて推定平均誤差をもつ確率的目標状態に対する MTTTS 期待値を以下のように定義する。

$$\tilde{E}_n = \sum_{j=1}^N \tilde{p}_j T(x_i, 0, x_f(j), v_f(j)). \quad (4.41)$$

ここで \tilde{p}_j は j 番目の状態 $(x_f(j), v_f(j))$ ($1 \leq j \leq N$) が目標状態となる確率である。これを本項では「MTTTS-s 期待値」と呼ぶ。

さらに、周期的準備状態から確率的目標状態への MTTTS およびその期待値について述べる。本項では周期的準備状態として、位置 x_c が以下の式で与えられる周期運動を用いた。

$$x_c = A \sin \omega t + x_o. \quad (4.42)$$

ここで A , ω は定数, t は時間である。実験では, $A = 0.05$ [m], $\omega = 6.32$ [rad/s] に設定した。 x_o は所与の推定確率的目標状態から事前に計算された推定最適初期停止位置である。この周期運動は、推定最適初期停止位置を中心として振幅 A で行われる単振動である。

未知の動作開始時刻の確率が時間的に一様であるとき、周期動作の各位相が初期状態になる確率は等しくなる。このため、周期 T の周期運動における j 番目の時刻 t_j ($t_j = jT/N_c$) の状態 $(x_c(t_j), v_c(t_j))$ から目標状態 (x_f, v_f) への MTTTS 期待値を以下のように定義する。

$$T_c = \frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} T(x_c(t_j), v_c(t_j), x_f, v_f). \quad (4.43)$$

ここで N_c は周期運動の状態数である。本項では、これを「周期的準備状態からの 2 状態間最短遷移時間期待値 (*expected value of MTTTS from Cyclic motions as initial states, MTTTS-c*)」と呼ぶ。これを用いて、周期準備状態から平均推定誤差をもつ確率的目標状態への MTTTS-c の期待値 \tilde{E}_c を以下のように定義した。

$$\tilde{E}_c = \sum_{k=1}^N \tilde{p}_k T_c \quad (4.44)$$

$$= \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{N_c} \tilde{p}_k T(x_c(t_j), v_c(t_j), x_f(t_k), v_f(t_k)) \quad (4.45)$$

これを本項では「MTTTS-c 期待値」と呼ぶ。

さらに、準備状態の評価値として MTTTS-s 期待値と MTTTS-c 期待値との差分

$$D_e = \tilde{E}_c - \tilde{E}_n \quad (4.46)$$

を計算した。これを用いて、平均推定誤差をもつ確率的目標状態に対して $D_e < 0$ であるとき、周期的準備状態が停止準備状態より短い時間で目標状態に到達でき、

$D_e > 0$ であるとき、停止準備状態が周期的準備状態より短い時間で目標状態に到達できるとした。

予測誤差に対する予備動作様式の影響

停止準備状態と周期的準備状態との比較のため、1自由度ロボットアームのモデルを用いて確率的目標状態への MTTTS を計算する数値シミュレーション実験を行った。実験では、MATLAB2011b (MathWorks) を用いて計算した。実験方法について以下に述べる。

まず、MTTTS の計算方法について述べる。最も単純なロボットのモデルとして、実験では1自由度ロボットアームのモデルを用いた。1自由度アームが2状態間を最短時間で遷移する場合、最大原理からその動作中では常に正または負の最大加速度をとり、その切替回数は高々1回である [12]。実験では、その正の最大加速度を 10 m/s^2 、負の最大加速度を -10 m/s^2 とした。またその1自由度アームの運動方程式として、

$$m\ddot{x} = f \quad (4.47)$$

を用いた。ここで x は位置、 \ddot{x} は加速度、 m は質量、 f は力である。この運動方程式と動作中は常に正または負の最大加速度を取るという仮定の下、切り替えの時刻とその時刻における位置と速度を変数としておき、動作終了時刻を計算した。そしてこの動作終了時刻を実験では MTTTS として用いた。

次に、実験の手順について述べる。まず、各初期位置から各状態への MTTTS-s を計算し、これを利用して各推定確率的目標状態への推定最適初期停止位置および MTTTS-c を計算した。次に、MTTTS-s 期待値と MTTTS-c 期待値とを平均と分散の異なる各確率的目標状態に対して計算した。最後に、推定確率的目標状態ごとに平均推定誤差を変えて評価値 D_e を計算した。

数値シミュレーション実験で得られた結果を以下に述べる。結果として、停止準備状態と周期的準備状態の特性比較、推定平均誤差による評価値 D_e の変化、および確率的目標状態の分散による停止準備状態—周期的準備状態間の関係性変化に着目した。

MTTTS-s と MTTTS-c とがもつ特性を比較するため、目標状態の変化による1つの停止準備状態からの MTTTS-s の変化とその位置を周期運動の中心とする周期的準備状態からの MTTTS-c の変化とをそれらの差分である評価値 $D_t (= T_n - T_c)$ を用

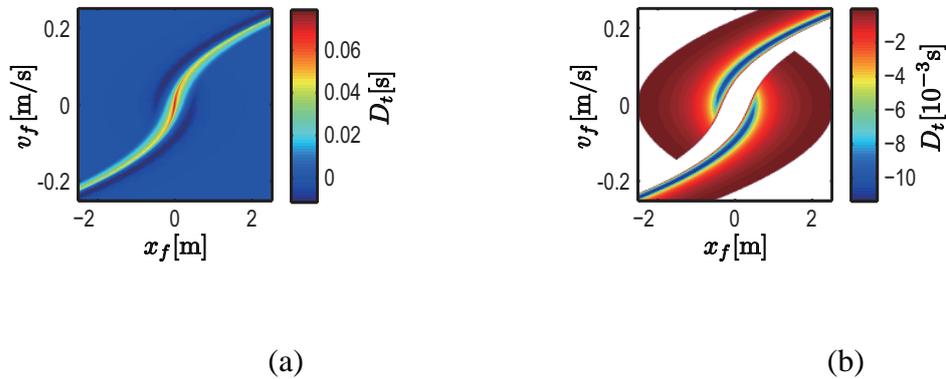


Fig.4.22 MTTTS maps: $x_i = 0$ [m], $x_o = 0$ [m].

いて確認した. この差分 D_t と用いたパラメータを表した図 (Fig.4.22), および見やすさのために Fig.4.22 (a) の中から $D_t < 0$ なる領域だけを表した図 (Fig.4.22) (b) より, 目標状態に対して $D_t > 0$ となる領域における最大の $|D_t|$ は目標状態に対して $D_t < 0$ となる領域のどの $|D_t|$ よりも大きいことが分かる. 加えて同図より, 目標状態空間において $D_t < 0$ となる領域の中で比較的 $|D_t|$ が大きい領域は, $D_t > 0$ となる領域に近いということが分かる. これより, それぞれ1つの停止準備状態と周期的準備動作から各目標状態へ遷移においてある領域では停止準備状態が適しており, 他の領域では周期的準備動作が適していることが分かった.

予測の困難な場合における準備状態の特性について調べるため, 推定平均誤差による MTTTS-s 期待値の変化と MTTTS-c 期待値の変化とをそれらの差分である評価値 D_e を用いて確認した. 推定平均誤差による D_e の変化と用いたパラメータの図 (Fig.4.23(a)), および Fig.4.23 (a) の中で $D_e < 0$ なる領域だけを表した図 (Fig.4.23 (b)) から, 推定平均誤差に対して $D_e > 0$ となる領域における最大の $|D_e|$ はその誤差に対して $D_e < 0$ となる領域のどの $|D_e|$ よりも大きいことが分かる. 加えて同図より, 推定平均誤差空間において $D_e < 0$ となる領域の中で $|D_e|$ が大きい領域は, $D_e > 0$ となる領域に近く, 位置の推定平均誤差が負の方向に大きく, 速度のそれがより正の方向に大きい領域であることが分かる.

目標状態の分散による $D_e < 0$ となる領域の変化を調べるため, Fig.4.23 (b) に見られるような D_e の正負が切り替わる推定平均誤差の境界の変化を確認した. 確認のために, 2つのその境界をそれぞれ直線に近似し, 中心 ($\Delta\mu_x = 0$ [m], $\Delta\mu_y = 0$ [m]) か

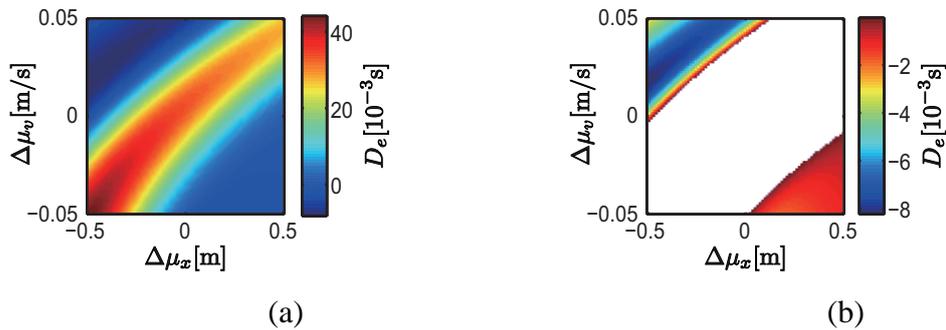


Fig.4.23 Changing difference of expected value of MTTTS by error of prediction:
 $\mu_x = 0.1$ [m], $\mu_v = 0.05$ [m/s], $|\delta_x| = 0.025$ [m], $|\delta_v| = 0.25$ [m/s]

ら各直線までの距離の和 d と平均推定誤差との関係を調べた。距離の和を表した図 (Fig.4.24) より、分散の増大によって境界を近似した直線同士の距離が大きくなることが分かる。これら実験で得られた結果について、次章で考察する。

タスク特性に応じた予備動作様式選択に関する考察

本実験で得られた結果について考察し、そこから推測される準備動作が与える影響について述べる。はじめに、本実験で得られた結果について考察する。停止準備状態と周期的準備状態との特性比較において、 $D_t > 0$ となる領域の目標状態に対して最大の $|D_t|$ が見られた。また同様に、推定平均誤差による評価値の変化において、 $D_e > 0$ となる領域の推定平均誤差に対して最大の $|D_e|$ が見られた。これらの結果から、目標状態が完全に誤差なく予測できる場合や、目標状態をほとんど誤差なく推測された場合、または目標状態の推測誤差が MTTTS-s 期待値を下げやすいものであった場合には、推定最適初期停止位置が適切に決定されて停止準備状態が適切な準備状態となると考えられる。さらに、確率的目標状態の分散による停止準備状態一周期的準備状態間の関係性変化において、分散の増大によって境界を近似した直線同士の距離が大きくなるという結果が得られた。これは確率的目標状態の分散が大きいほど、 $D_e > 0$ となる領域が広くなることを意味し、分散が大きいほどより大きい推定平均誤差があった場合においても停止準備状態の方が準備状態に適していることを示唆する。この結果からも同様に、確率的目標状態の分散が大きいと事前に分かっている場合には、推定最適初期停止位置が適切に決定されて停止準備状態が適切な準備状態となると考えられる。

さらにこの結果から、分散に推定誤差をもつ場合においても平均に推定誤差を保つ場合と同様の結果が得られることが推測される。加えて、分散が非常に大きい場合においても停止準備状態が周期的準備状態よりも短い時間で目標に到達できる傾向があったため、目標状態が一様分布や複数の正規分布を混合した分布に従う場合においても正確に予測可能な場合には停止準備状態がより短い時間で目標に到達できると推測される。

一方で、停止準備状態と周期的準備状態との特性比較において $D_t > 0$ となる領域の近くに $D_t < 0$ となり比較的 $|D_t|$ が大きい領域が見られた。また同様にして、推定平均誤差の大きさによる評価値の変化において、 $D_e > 0$ となる領域に近く、位置の推定平均誤差が小さく、速度の推定平均誤差が大きい領域に $D_e < 0$ となる領域の中で比較的 $|D_e|$ が大きい領域が見られた。これらの結果から、推測から一定の誤差をもつ目標状態に対して周期的準備状態が適切な準備状態となりうると考えられる。

以上の傾向は、正確に目標状態が予測された場合には、周期的準備状態において目標状態から遠ざかることによって遷移時間期待値が十分に大きく増加するためであると推測される。一方で、目標状態が推測から一定の誤差をもつ場合には周期的準備状態において多様な状態をとることで、遷移時間期待値が停止準備状態よりは増加しない場合があると推測される。またこのような傾向は、多自由度のロボットにおいても見られると考えられる。さらに、重力下にあるロボットや身体に弾性要素を備えたロボットにおいても、周期的準備状態において目標状態から遠ざかることによって遷移時間期待値が十分に大きく増加する場合には停止準備状態の方がより短い時間で目標状態に到達可能であると考えられる。

次に、準備動作の特性が与える影響について考察する。まず、確率的目標状態に対して過去の経験を基に準備動作を行う場合を考える。このように試行から目標状態を推測する状況は、推定平均誤差をもつ確率的目標状態が与えられる一例である。なぜなら、正規分布に従う標本から得られる標本平均は、母分散に比例し試行数に反比例する分散をもつために推定した目標状態の平均が真の目標状態の平均と誤差を生じるからである。本実験において、周期的準備状態が停止準備状態より小さい MTTTS 期待値を生む推定平均誤差は母分散と比較して十分大きいものであった。このため、試行数と分散によって推定平均誤差が生じた場合においても、停止準備状態の方がより適した準備状態となると考えられる。一方で、本実験において目標状態が急激に変化して過去の経験から逸脱した目標状態が与えられる場合や、経験からの予測が困難

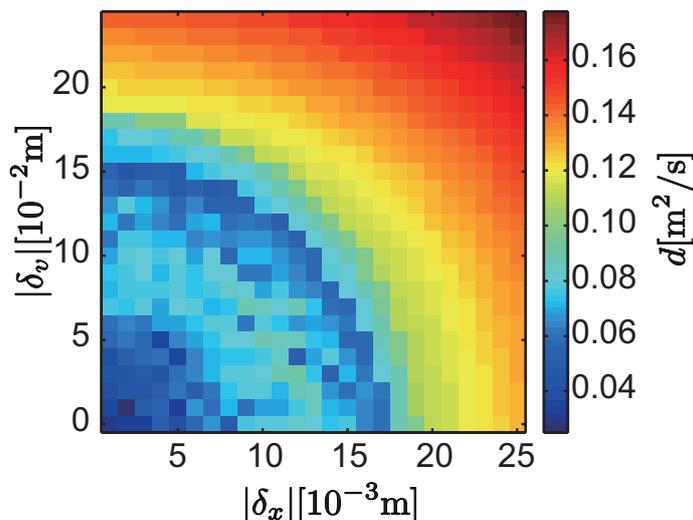


Fig.4.24 Increasing distance between two approximate boundary lines as decreasing size of population variance.

な場合には、周期的準備状態がより適した準備状態であることが示唆された。これより、「ある予測困難な状況において、速度成分を含む準備動作が速度成分を含まない準備動作よりも反応動作の速度を向上させる」という仮説が正しいと結論付ける。また今後の研究において、具体的なタスクとロボットにおいてどのような周期的準備状態が停止準備状態より適した準備状態となるかについて検討することが必要だと考えられる。

本項では、ロボットが予測困難な状況下で高速な反応動作を行うための準備動作を検証するため、その第一歩として単純なロボットアームモデルを用いた数値シミュレーション実験を行った。実験では、準備状態として停止準備状態と周期的準備状態を比較し、それぞれの状態から推定平均誤差をもつ確率的目標状態への最小遷移時間期待値を計算した。結果として、推測からの誤差をもつある目標状態に対しては、周期的準備状態の方が適した準備状態となる可能性があるという結論を得た。

4.3 運動指令切り替えタイミングの修正による運動調節法

運動指令切り替えタイミングの修正による跳躍打撃動作の調節について述べる。

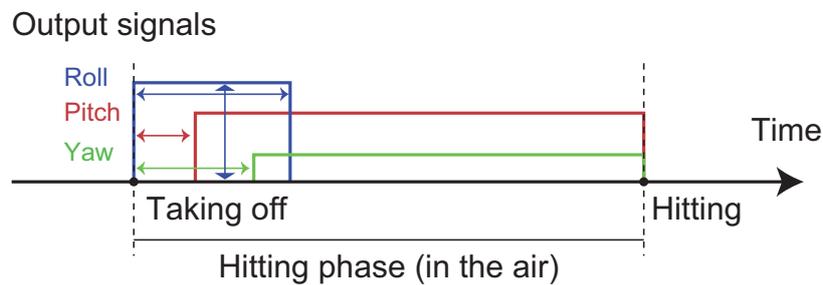


Fig.4.25 Idea of motion adjustment

4.3.1 提案するタイミング調節法

本研究で提案するタイミング制御による打撃動作について述べる。運動指令の切り替えタイミングを修正することで運動を調節する手法を提案する。運動指令は一定時間変化せず、切り替えタイミングの前後でのみ変化する。この調節方法の利点として、目標指令値への厳密な追従を要求しないこと、パラメタは切り替えタイミングだけであり、制御、および学習目的のパラメタが少ないことなどが挙げられる。

跳躍打撃動作における切り替えタイミングとして、離陸後の打撃スイングの開始がある。本項では、このタイミングを調節することで打撃スイングを調節することに取り組む。調節では、初期姿勢の誤差、実行された運動の誤差、計測誤差、および学習誤差が挙げられる。調節の目的は、これらの誤差全ての影響によって状況に適さなくなった運動を状況に適した運動へと変化させることである。このためロボットは、離陸時刻の状態とその時刻におけるボールの状態から、目標に最も近づく切り替えタイミングの計算方法を学習し、学習に基づいてタイミング調節を行う。

提案する調節手法は、時間で分割され、離散化された運動表現によって行われる運動一般に利用可能である。空気圧ロボットなどのオープンループで運動を生成するロボットに適用できる点が特徴である。

4.3.2 多様な打撃が要求する過渡的移動動作のパターン数

多様な跳躍打撃動作を行うのに必要な跳躍パターン数について調べるため、本項では矢状面において行われる跳躍打撃動作を網羅的にシミュレーションし、解析した。

解析手順について述べる。まず、前述した方法でロボットの跳躍打撃動作、ボール軌道、および打撃結果を網羅的に生成し、収集した。次に、各ボール軌道に対して、打撃からボールが着地するまでの時間が1s以上で、着地点が $x = 4$ [m]に最も近い打撃動作を選択した。ここで、打撃からボールが着地するまでの時間が1s以下か、着地点と位置 $x = 4$ [m]の距離が1m以上の打撃結果しか得られないボール軌道からは、打撃動作を選択しなかった。最後に、選択された打撃動作を打撃したボール軌道数が多い順に並べ、打撃したボール軌道数が多い順に何番目の打撃動作までで、何パターンのボール軌道を打撃できるかについて調べた。

結果について述べる。選択された跳躍パターン数は全部で29であり、打撃可能なボール軌道のパターン数は全部で648であった (Fig.4.26, right)。打撃したボール軌道数が多い順に6番目の打撃動作までで全体の92.13(> 90)%, 9番目の打撃動作までで95.52(> 95)%のボール軌道を打撃できることが分かった (Fig.4.26, left)。ここで、この9パターンの動作からの $n(n = 1, \dots, 9)$ 個選択するパターンを網羅的に行った場合においても、同様の結果が得られた。これらの打撃動作を行った場合の離陸時刻における重心の位置と速度 (Fig.4.27) から、1番目と6番目、および5番目と9番目の動作における重心位置は距離が近く、それ以外は互いに離れて分布していることが分かる。この理由として、1番目と6番目、および5番目と9番目の動作間の重心位置は近いが、姿勢が異なるため、異なるボール軌道の打撃に用いられたと考えられる。ここで、6番目および9番目以外の動作で打撃可能なボール軌道の割合は91.513(> 90)%であった。このため、互いに離陸時刻で異なる重心位置をとる7パターン跳躍によって、ほとんどのボール軌道に対して打撃できると考えられる。以上の結果から、矢状面上でのボール軌道パターンに対しては、互いに離陸時刻の位置が離れた9パターンの跳躍によってほとんどのボールを打撃できることが分かった。

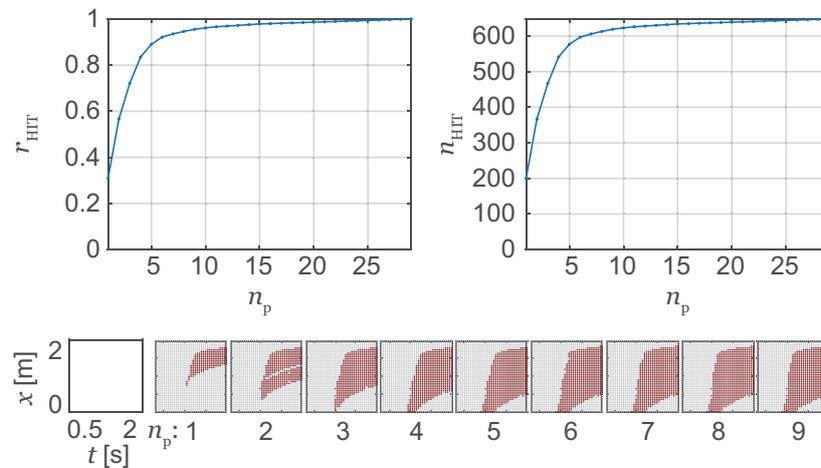


Fig.4.26 Hiitable area with number of jump patterns.

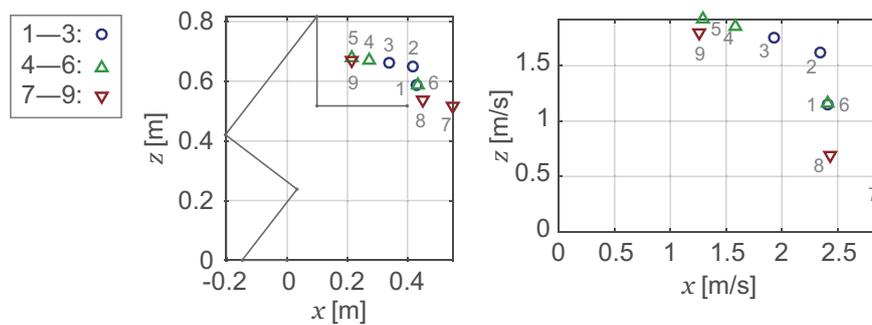


Fig.4.27 Position and velocity of center of gravity of the robot at landing with wide hit motion.

4.3.3 単純モデルを用いた基礎的検討

提案手法の有効性について，単純モデルを用いた動力学シミュレーションによって基礎的な検討を行った．まず実験設定について述べる．実験では，跳躍打撃動作の打撃局面における矢状面上の運動に着目した．このため，ロボットの身体を単純化したモデル (Fig.4.28) を用いた．このモデルは空中における打撃動作を表す最小構成 (Fig.4.29) として，体幹リンクと腕リンクを備えている (Table4.2)．実験では，所望の時間以上にボールが空中を飛行し，所望の位置に落下するように，ロボットが前方から飛来するボールを空中で打撃することを想定した．ロボットの運動は，関節トル

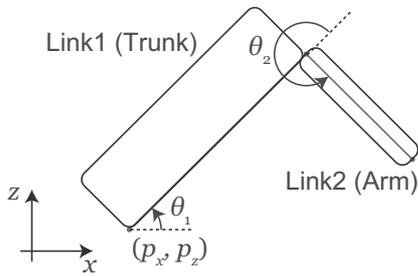


Fig.4.28 Model of a robot in the air.

Table4.2 Parameters of a model in the air.

Link	Length [m]	Mass [kg]	Inertia [kgm ²]
1	1.0	15	1.71
2	0.6	2	0.01

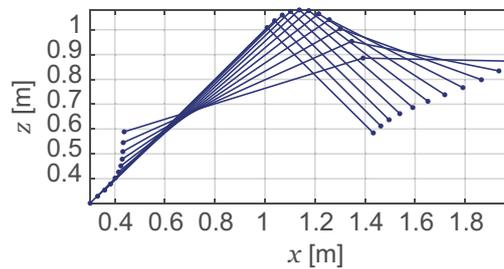


Fig.4.29 Snapshots of hitting motion of the model in the air.

クとして一定値を与えた。簡単のため、与えたトルク指令がトルクとして発生するとした。

実験手順について述べる。第一に、誤差のない状態における理想的な打撃動作およびそのボール軌道を計算した。まず、ロボットの離陸直後の状態である初期状態、ボールの物理パラメタ、この状況における指令切り替えタイミング、ボールの飛行開始位置、目標ボール着地位置、および最小の打撃後のボール飛行時間を設定した。次に、ボールが飛行を開始してからロボットが跳躍するまでの時間、および跳躍から運動指令切り替えタイミングまでの時間を網羅的に試し、所望の結果に最も近い結果を得られるパラメタを取得した。ここで、動作中の手先とボールとの距離の最小値がボールの半径を下回るかを判定し、下回った場合には打撃が行われ、上回る場合には空振りや腕以外でのボールの打撃を行って打撃に失敗したとした。打撃後のボール速度は付録のモデルを用いて計算した。最後に、取得した時間のパラメタからボールの初速を計算した。以上の運動計算において、簡単のため空気抵抗は無視した。

第二に、誤差を含んだ各状況における最適な指令切り替えタイミングを学習した。

まず、初期状態およびボールの初速度に誤差を与え、異なる指令切り替えタイミングで行われた動作を生成した。次に、各動作に対して上記の方法で打撃結果を計算した。最後に、打撃後にボールが所望の時間以上に飛行し、ボールの落下位置が目標位置に最も近い結果を得られた動作の指令切り替えタイミングを、その誤差に対して最適なタイミングとして保存した。

第三に、異なる誤差を含んだ状況下における最適タイミングを収集し、収集したデータに基づいて所与の誤差から指令切り替えタイミングを計算するモデルを構築した。このモデル構築では、SVRを用いた回帰を行った。カーネル関数として、線形カーネルとRBFカーネルを用いた。

第四に、新たに誤差を含んだ状況において指令切り替えタイミングを計算、運動を実行し、打撃結果を収集した。

実験で用いたパラメタについて述べる。ロボットの状態を $q = [x, z, \theta_1, \theta_2]^T$ 、および \dot{q} を用いて表現した (Fig.4.28)。ロボットの初期状態として、 $q(0) = [0.3, 0.3, \pi/4, 3\pi/2]^T$ 、 $\dot{q}(0) = [1.5, 1.5, 0, 0]^T$ と設定し、誤差のない状態における切り替えタイミングを $t = 25$ [ms] と設定し、ボールの飛行開始位置を $x = 7$ [m]、 $z = 1$ [m]、打撃後のボールの目標着地位置を $x = 4$ [m]、打撃後の着地までのボールの最小時間を $t = 1$ [s] と設定し、訓練回数および試験回数はそれぞれ 100 回 と設定した。指令切り替えタイミング以前、以降の関節トルクはそれぞれ $0\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $40\text{ N}\cdot\text{m}$ と設定した。ボールの初期速度、およびロボット初期状態の誤差をそれぞれ、各要素の絶対値の前後に 5%、1% の幅の一様乱数で与え、誤差を含む状態のボールの初期速度、およびロボット初期状態を決定した。

実験結果について述べる。誤差のない状態における理想的な打撃動作およびそのボール軌道として計算されたボール飛行開始から跳躍までの時間は $t = 430$ [ms]、ボールの初期速度は $\dot{x} = -10.32$ [m/s]、 $\dot{z} = 2.09$ [m/s] であった。

RBFカーネル (RBF)、線形カーネル (Linear)、および調節なし (Nothing) の場合それぞれにおける落下位置の平均と標準誤差を比較した (Fig.4.30)。その結果、線形カーネルを用いた場合が調節なし、およびRBFカーネルを用いた場合よりも誤差の平均が小さかった。これは、調節によって打撃後のボール落下位置が目標位置に近づいたためと考えられる。さらに、学習パラメタ 10 変数に対してサンプル数 100 が小さかったため、線形カーネルの方が有利であったと考えられる。線形カーネルを用いた打撃における落下位置の誤差平均は 31 mm であり、調節なしのそれ 72 mm の

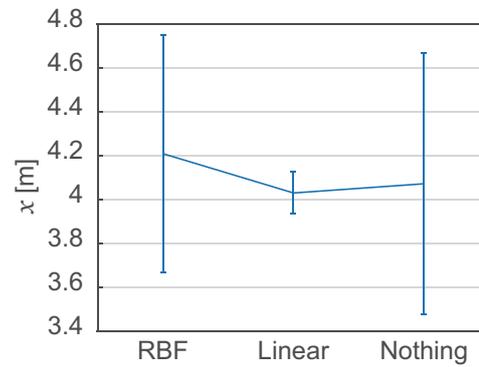


Fig.4.30 Error of hitting with/without adjustment by a flying robot model.

42%であった。以上の結果から、基礎的な状況下で提案手法の有効性が示されたと結論した。

第5章

跳躍打撃動作の学習法と調節法

本章では，前章で提案した動作学習・生成法および運動修正法の改良し，腕付脚式ロボットへの適用，ヒューマノイドへの運動調節法の適用可能性の検討，誤差が打撃結果に与える影響の調査，および動作生成と運動調節の同時学習について述べる．

5.1 跳躍打撃動作の学習法

前章で提案した動作生成・学習手法を改良し，跳躍打撃動作に適用した．拡張した手法の有効性を検証するため，腕付二脚ロボットの跳躍打撃動作シミュレーションを行い，手法を評価した．

5.1.1 分類と順モデルを用いた状態・指令関係学習法

跳躍打撃動作はロボットの身体に大きな負荷を与える動作であるため，少ない訓練試行で効率的に学習を行う必要がある．訓練サンプルが少数であり，ロボットの運動する次元，関節の自由度が高いため，過学習が発生するおそれがある．このため，実訓練データに基づいて，運動指令から状態への順モデルを学習し，このモデルを用いて多数の指令・状態ペアを生成することで訓練データを疑似的に増やす処理を加える．

具体的にはまず，訓練試行において運動軌道を互いの類似度に基づいて分類してクラスタを作成し，全てのクラスタと時刻それぞれにおいて，状態と指令の関係性を学習し，指令から状態を計算する順モデルを作成する．次に，取りうる運動指令と時間

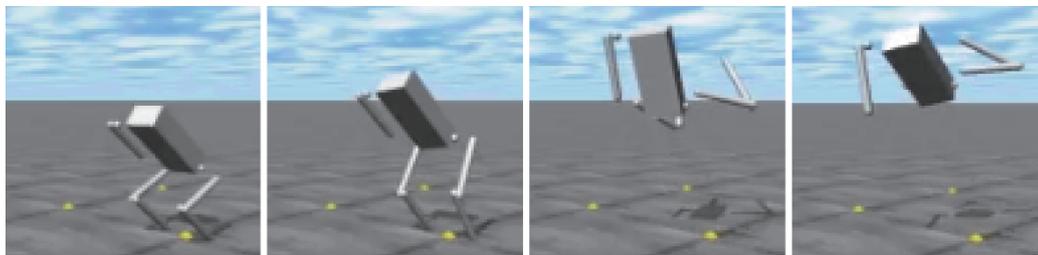


Fig.5.1 Snapshots of jump hit motion in simulations.

の全てをクラスと時刻ごとに生成されたモデルに与え、各時刻における状態を計算し、状態、運動指令、時間の組み合わせを保存する。最後に、運動指令と時間を予測する時には、所望の状態に最も近い状態を検索し、その状態と組み合わせられている運動指令と時間を参照する。以上が本章で改良した運動学習・生成法の詳細である。

5.1.2 跳躍打撃動作学習シミュレーション

実験方法について説明する。まず、実験環境について述べる。ロボットの運動を計算する動力学計算に ODE を用いた。ロボットのモデルとして、2つの脚と1つの腕を備えた身体を用いた (Fig.5.1)。このモデルは関節自由度として、肩と左右の股関節にロールとピッチの2自由度、左右の膝に1自由度の計8自由度を備えている。一般的な二脚式ロボットと比較して、このモデルの関節自由度数は小さい。これは、この自由度数のロボットが適切な運動指令を与えられることで、十分多様な跳躍打撃動作を行うことが可能であると判断したためである。四肢の各リンクは直径 40 mm のカプセルで近似した。床面との摩擦は無量大とした。動力学計算に用いるパラメータは、運動指令の変化に対してロボットの運動が連続的に変化するような適切な値を決定した。

次に、運動生成法について述べる。ロボットの各関節は空気圧ケーブルシリンダによって駆動されることを想定した。このため、圧力変化の計算に3章で述べたものを使い、チャンバ内部の動的な空気圧変化を模擬するモデルを実装した (Fig.5.2)。ロボットの指令は、時間区分一定の目標チャンバ内圧力として与えた。時間区分を3つに分割した。これは、最小の時間区分で跳躍し、次の時間区分で滞空し、最後の

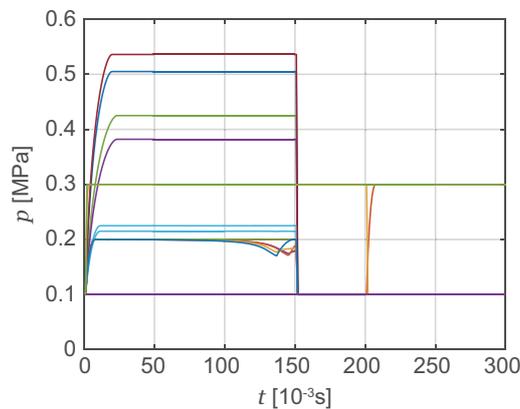


Fig.5.2 Inner pressure of jump hit motion in simulations.

時間区分で腕を振ることを想定したためである。それぞれの時間を、150 ms, 50 ms, 100 ms に設定した。シミュレーションする運動全体の時間を 300 ms, タイムステップを 0.1 ms に設定した。運動指令の圧力値は 3 章の跳躍打撃動作のシミュレーションにおけるトルクを参考にして決定した。

最後に、学習とその評価方法について述べる。学習対象とする運動として、典型的な跳躍打撃動作に類似した運動を選択した (Fig.5.1)。典型的な跳躍打撃動作は、時間区分および運動指令を一定区間内で一様乱数を用いて無作為に選択し、それらの運動指令から生成された運動の中から前方に跳躍し、打撃する動作を選択した。典型的な跳躍打撃動作に類似した運動として、典型的な跳躍打撃動作を生成する運動指令に変化を与え、変化した運動指令から生成された運動を用いた。

学習では、まず互いに異なる運動指令から生成された運動を収集した。次に、そこから訓練回数分の運動を無作為に抽出し、学習に用いた。学習では、memory-based な手法と学習の比較、逆モデルと順モデルの比較、および分類の比較を行うため、目標手先位置に最も近い過去の手先位置を選択し、その位置へ至った時間と指令を解とするモデル (最近傍法, knn) 手先位置からそこへ至る時間と運動指令を計算するモデル (逆モデル, inv.), 運動の類似性によって分割された手先位置からそこへ至る時間と運動指令を計算するモデル (分割逆モデル, c-inv.), 運動指令と時間から手先位置を計算するモデル (順モデル, fwd.), および運動の類似性によって分割された運動指令と時間から手先位置を計算するモデル (分割順モデル, c-fwd.) のモデルをそれぞれ

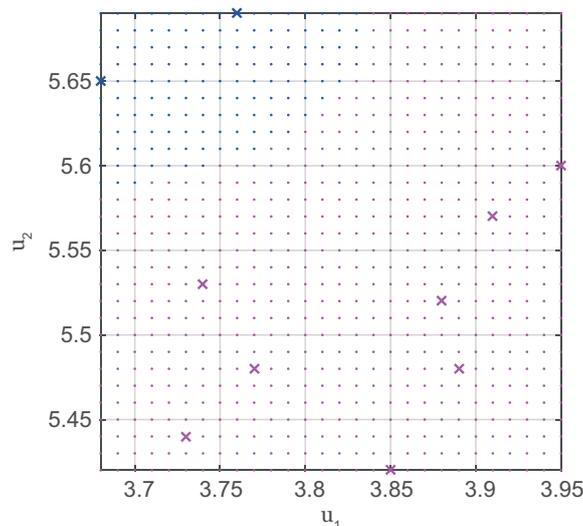


Fig.5.3 Prediction of clusters of output commands.

れ学習した。運動類似性の表現には、各関節位置およびリンク末端位置の XYZ 座標値を全時間分もつベクトルを用いた。運動類似性に基づく分割では、クラスタ数を 2 に設定し、クラスタ内の平均距離を最小化する階層型クラスタリングを行った。各モデルの分類には SVM を (Fig.5.3)、回帰には SVR を用いた。この図において、クラスが与えられた各運動指令値と、運動指令が分類され、網羅的に与えられた指令が 2 つのクラスタに分類される様子が見て取れる。手先位置から時間の予測には線形カーネルを用いた (Fig.5.4)。図は、分類された手先軌道 (青、紫がそれぞれのクラスタ) と、学習モデルを用いて予測された特定の時刻における手先位置 (点群) を表しており、クラスタごとにある指令から手先位置を計算する構造が学習されたことが見て取れる。手先位置から運動指令の予測には RBF カーネル、運動指令と時間からの手先位置の予測には線形カーネル、運動類似性に基づく運動指令空間および手先位置の分割には RBF カーネルを用いた。これらのカーネルは試行錯誤によって決定した。学習の評価では、手先目標位置として、訓練試行として与えられなかった運動を 1 つ 選択し、選択された運動の 260–280 [ms] における手先位置から 1 つ 選択した。これは、この時間領域において手先状態が打撃に適する状態になり、実際の跳躍打撃において選択される目標位置を想定するためである。学習した各モデルから予測された運動指令を用いて運動を生成し、生成された運動において予測された時間における手先位置

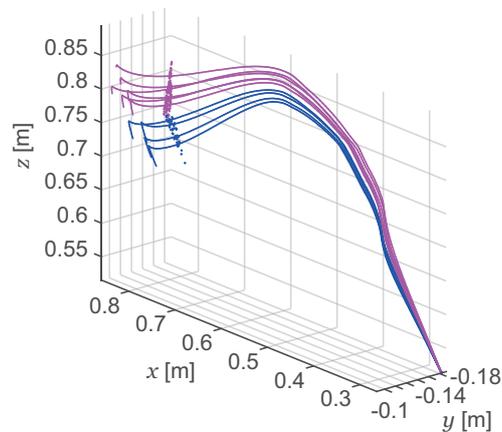


Fig.5.4 Hand trajectories and its predicted positions.

を計算し，目標手先位置との誤差を評価値として用いた．この誤差は，最近傍法の誤差と比較した．順モデルを利用する場合には，運動指令を想定した場合の各時刻における手先位置をモデルから生成し，生成された手先位置から目標手先位置に最も近い手先位置を計算し，その位置を生成した運動指令を選択した．実験では，訓練回数を10回に設定し，訓練と学習評価を100回反復した．以上が実験方法の説明である．

右股関節ピッチ軸の運動指令を標準的な運動指令から， -0.2 – 0.2 [MPa] の範囲 0.01 MPa で変化させ，学習，予測，実行した時の，目標手先位置と実行時の手先位置との誤差を各手法で比較した．

以下に，実験結果について述べる (Fig.5.5)．図は，各手法の手先誤差の平均と標準偏差を表している．この図から，分割逆モデル以外の方法は，最近傍法を用いた予測よりも誤差が小さいこと，分割順モデルが最も小さい誤差を生じたことが分かる．具体的には，分割順モデルの誤差平均は 1.5 mm であり，逆モデルの誤差平均 4.8 mm の 31% であった．この結果から，提案する分割と回帰を用いた学習手法が，腕付二脚空気圧ロボットにおいても有用であることが分かった．

5.2 跳躍打撃動作の運動調節法

前章で提案した運動調節法を全身を備えたロボットによる3次元上での跳躍打撃動作に適用し，そのようなロボットへの手法の適用可能性を検討した．まず，全身ロ

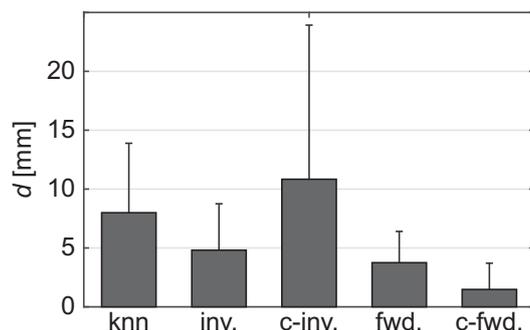


Fig.5.5 Comparison of learning method. Distance between target position and hand position.

ロボットへの適用可能性を確認した。次に、誤差補償の効果と、補償すべき運動特徴について定量的に検討した。最後に、動作生成と運動調節の同時学習の可否を検討した。

5.2.1 ヒューマノイドロボットにおける運動調節法

本節では前章で提案した運動調節法の全身ロボットへの適用可能性を検討する。動力学シミュレータ上でヒューマノイドの打撃動作を調節し、打撃結果を推定して、提案した運動調節法で運動が適切に変化することを確認した。さらに、ボール位置の計測誤差、運動の実行誤差、および身体モデル化誤差に対して提案する運動調節手法が有効であることを確認した。

運動調節実験の目的と方法について述べる。本実験の目的は、提案した打撃動作調節法の適用可能性を示すことである。具体的には、ボール位置の計測誤差、運動の実行誤差、および身体モデル化誤差に対して打撃動作を調節し、所望の打撃結果を得られるかを確認する。

方法として、動力学シミュレータを用いてヒューマノイドの運動を模擬し、打撃動作が調節されたことを確認する。動力学シミュレータには、OpenHRP3 [175] を用いた。タイムステップは 1ms に設定した。用いたロボット等のモデル、および運動の生成法について以下に述べる。

ロボットのモデルは、3.4.2 で開発したヒューマノイドの身体パラメータに基づいて作成した。ヒューマノイドの可動域は実機に基いて設定し、可動域限界の設定のため

Table5.1 Mass of each link in the humanoid robot model.

Link	Trunk	Hip	Upper leg	Lower leg	Foot
Mass [kg]	10.0	0.4	1.2	0.9	0.2
Link	Shoulder 1	Shoulder 2	Upper arm	Forearm	
Mass [kg]	0.7	0.2	0.6	0.2	

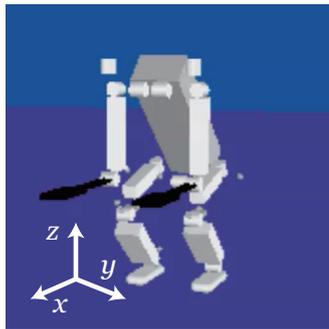


Fig.5.6 Appearance of the robot model.

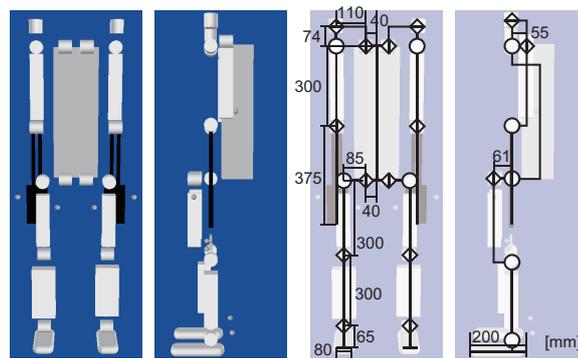


Fig.5.7 Joint composition and link length.

にリンク間に衝突を仮定し、関節を停止するための部品をモデルに追加した。このモデルの概観と世界座標系を Fig.5.6 に、自由度構成、およびリンク長を Fig.5.7 に、各リンクの重量を Table5.1 に示す。モデルの全長は 1.245 m、重量は 18.8 kg である。ヒューマノイドと床面は非常に滑りにくいと仮定し、摩擦係数は 10.0 とした。脚関節の最大トルクを 100 N·m、腕関節の最大トルクを 40 N·m とした。

実験で用いた跳躍打撃動作の生成法について述べる。3.1.2 で述べたように、跳躍打撃動作におけるロボットの重心軌道は重心スライド局面、跳躍局面、空中局面に分割して生成した。重心スライド局面における重心軌道の生成法について説明する。この局面において、重心は鉛直方向に運動しないと仮定した。重心スライド局面の終端において、重心は左爪先の直上を通過するとし、その時の重心速度を設定した。加えて、この時の重心加速度を 0 とした。運動開始時刻においてヒューマノイドは静止させた。重心位置の各成分が時間の 5 次方程式で表されるものとし、設定した重心位置、速度、加速度を境界条件として係数を計算した。

跳躍局面の重心軌道および両膝関節の角速度、角加速度は、3 章 2 節で説明した重

心軌道の生成法に従って、重心軌道を生成した。

両腕に備わる関節の参照軌道の生成法について説明する。両足の爪先は運動開始から跳躍までの間、位置が移動しないとして制約を与えた。腕の各関節には、離陸時刻における姿勢と速度を設定した。跳躍時刻における各関節の角加速度を0とした。打撃腕の肘の角度は、離陸時刻において完全に伸展するように設定した。各関節の角度が時間の5次方程式で表されるものとし、設定した跳躍時刻の角度、角速度、角速度を境界条件として係数を計算した。計算した係数を用いて各関節の参照軌道を計算した。計算した各関節の参照軌道と重心軌道に基づいて、重心軌道、重心周りの角運動量、足先位置を制約として、参照軌道との関節角速度の自乗和が最小となるように各関節の目標速度を計算し、P制御を行った。脚関節と腕関節のPゲインをそれぞれ400, 200と設定した。

打撃局面における運動生成法について説明する。打撃局面では、打撃腕以外の関節にはトルクを印加しなかった。打撃腕の肘は伸展方向に10N·mのトルクを与え、肩の3関節には、提案した運動調節法に従って方形波のトルクを与えた。方形波の大きさは40N·mとした。

ロール軸は調節パラメタが正のときにはパラメタの絶対値の時間、正方向に方形波のトルクを与え、調節パラメタが負のときにはパラメタの絶対値の時間、負方向に方形波のトルクを与えた。ヨー軸とピッチ軸は、離陸後、調節パラメタの時間経過してから運動のシミュレーションが終了するまで負方向に方形波のトルクを与えた。

以上の手順で生成した跳躍動作をFig.5.8に示す。Fig.5.8から、ヒューマノイドが跳躍し、空中で左腕を振る様子が見て取れる。

打撃におけるボールと腕部の衝突には弾性衝突を仮定した。具体的な計算方法は、3.1.2と同じものを用いた。

本項では、運動調節パラメタが打撃に与える影響を調べる。ここで、ボールが計測誤差をもつ場合に、運動調節パラメタによって打撃動作が調節された場合の打撃の結果をシミュレーションする。そこから、誤差に応じて運動調節パラメタが選択できることを示す。

計測誤差として、ボールの位置推定誤差を仮定し、同一の時刻における真のボール位置からボールの軌道を計算する。一方、運動調節パラメタを網羅的に与え、パラメタが与えられた時のロボットの運動をシミュレーションする。シミュレーションしたロボットの運動とボールの軌道を組み合わせ、各時刻におけるヒューマノイドの打撃

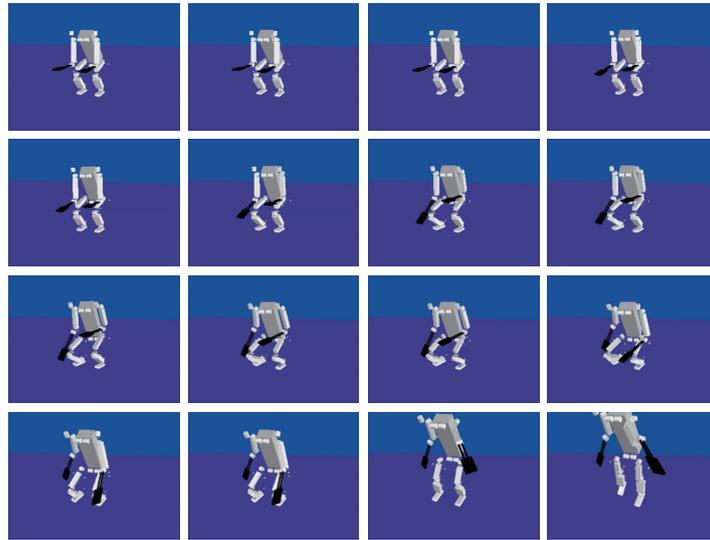


Fig.5.8 Snapshots of hitting motion of the robot model.

部位とボールの中心位置の距離から打撃の有無を判定する．打撃が生じたと判定された場合，その時刻（打撃時刻）における打撃部位の速度とボールの速度から弾性衝突を仮定して打撃直後のボールの速度を計算する．打撃直後のボールの速度と打撃時刻におけるボールの位置からボールの落下位置と落下までの時間を計算する．ボールの落下位置と落下目標位置 $(x, y, z) = (4.0, 0.0, 0.0)$ [m] の距離が 1 m 以内かつ落下までの時間が 1 秒以上だった場合，その軌道とその運動調節パラメタの組み合わせによって生じた打撃が成功したと定義した．ここでボールの軌道予測では重力のみを仮定し，空気抵抗を無視した．重力加速度を 9.8 m/s^2 に設定した．

跳躍打撃動作の生成に用いたパラメタの値を Table5.2 に示す．ここで， θ_d は重心スライド局面終了時刻における目標重心速度ベクトルと x 軸とがなす角度である．

誤差のない場合のボールの位置には，運動調節パラメタが全て 0 の場合に打撃に成功するものを選択した．運動調節パラメタの変化として，離陸からピッチ軸のトルクを与え始めるまでの時間を表す d_{PIT} ，および離陸からヨー軸のトルクを与え始めるまでの時間を表す d_{YAW} を 0 から 50 ms まで 5ms 刻みでそれぞれ変化させた．離陸からロール軸のトルクを与え始めるまでの時間とロール軸に与えられるトルクの方角を表す d_{ROL} を -55 ms から 55ms まで 5ms 刻みで変化させた．

Table5.2 Jumping and hitting motion parameters.

Parameter	a	t_p	t_o	θ_d
Value	2.0	0.3 s	0.17 s	0.5235
Parameter	$q_{R_{pIT}}(t_j)$	$q_{R_{yAW}}(t_j)$	$q_{R_{rOL}}(t_j)$	$q_{R_{eLB}}(t_j)$
Value	0.0	-0.5235 rad	-0.2618 rad	-0.5235 rad
Parameter	$\dot{q}_{R_{pIT}}(t_j)$	$\dot{q}_{R_{yAW}}(t_j)$	$\dot{q}_{R_{rOL}}(t_j)$	$\dot{q}_{R_{eLB}}(t_j)$
Value	0.0 rad/s	0.0 rad/s	0.0 rad/s	0.0 rad/s
Parameter	$q_{L_{pIT}}(t_j)$	$q_{L_{yAW}}(t_j)$	$q_{L_{rOL}}(t_j)$	$q_{L_{eLB}}(t_j)$
Value	-1.4 rad	-0.25 rad	0.1 rad	0.0 rad
Parameter	$\dot{q}_{L_{pIT}}(t_j)$	$\dot{q}_{L_{yAW}}(t_j)$	$\dot{q}_{L_{rOL}}(t_j)$	$\dot{q}_{L_{eLB}}(t_j)$
Value	0.0 rad/s	0.0 rad/s	0.0 rad/s	0.0 rad/s

実験結果について述べる。まず、運動調節がない場合の打撃の結果を確認する。次に、運動調節パラメタによる打撃結果の変化を確認する。さらに、運動調節パラメタによる打撃部位の変化を確認し、生じた誤差から運動調節パラメタを計算できることを示す。

運動調節をしない場合のボールの落下地点を Fig.5.9 に示す。図において、赤い点が成功した打撃動作によるボールの落下地点、青い点が失敗した打撃動作によるボールの落下地点である。これより、試行した誤差の範囲内において、運動調節をしない場合に跳躍打撃動作が失敗することが分かる。運動調節をしない場合に打撃に成功したボール軌道に備わる誤差を Fig.5.10 に示す。左上から、それぞれの図は z 軸方向の誤差が -0.01 m から 0.01 m の場合までを 0.001 m 刻みで表している。灰色および赤い点がそれぞれの誤差を表している。赤い点は調節なしで打撃に成功した場合における位置推定誤差の値を表している。これより、誤差の小さいものでは成功するが、大きいものでは失敗することが分かる。加えて、特定の方向の誤差にはロバストに成功できるが、他の特定の方向の誤差が与えられた場合には、小さい誤差でも失敗することが分かる。具体的には、最大 0.1378 m の誤差が生じても成功したのに対し、最小 0.0224 m の誤差による失敗も観察された。

網羅的に運動指令時刻切替を与え、運動調節をした場合に打撃に成功したボール軌

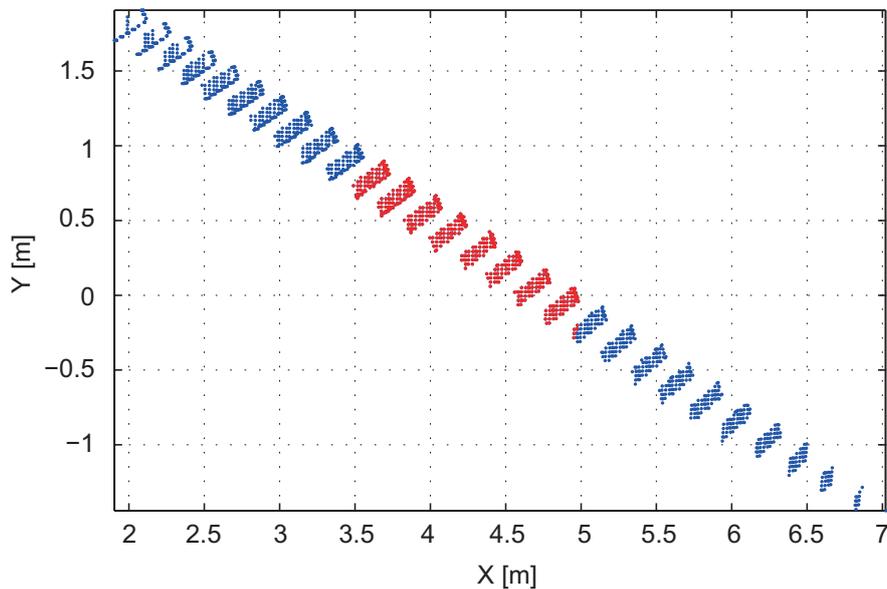


Fig.5.9 Ball landing positions with measurement errors and without motion adjustment.

道に備わる誤差を Fig.5.11 に示す. 左上から, それぞれの図は z 軸方向の誤差が -0.01 m から 0.01 m の場合までを 0.001 m 刻みで表している. 灰色および赤い点がそれぞれの誤差を表している. 赤い点は調節なしで打撃に成功した場合における位置推定誤差の値を表している. Fig.5.10 と比較して, 適切なパラメタを選択できれば, より多くの誤差パターンに対して成功することが分かる. さらにこれより, 成功するパラメタの領域が非凸の形状であることが分かる. 加えて, 調節のない場合と同様に, 小さい誤差でも失敗する方向があることが分かる. 具体的には, 最大 0.1578 m の誤差が生じても成功したのに対し, 最小 0.0447 m の誤差による失敗も観察された. Fig.5.12 に, 打撃に成功した誤差のパラメタ数を示した. 左から, 運動調節なしで成功したパラメタ数, 運動調節ありで成功したパラメタ数, 試したパラメタ数である. ここで, 調節なしで成功したパラメタ数が全体の 5.6% だったのに対して, 調節ありで成功したパラメタ数は全体の 47.2% だった. 以上の結果から, 調節を行うことで多くの誤差のパターンに対して, 打撃を成功させられることが分かった.

誤差のそれぞれに対して, その誤差が生じたボールの打撃に成功した運動調節パラメタの平均と, 成功した打撃部位の平均を計算した. 計算した打撃部位の位置, 打撃部位の速度, および打撃部位に垂直なベクトルをそれぞれ Fig.5.13, Fig.5.14, およ

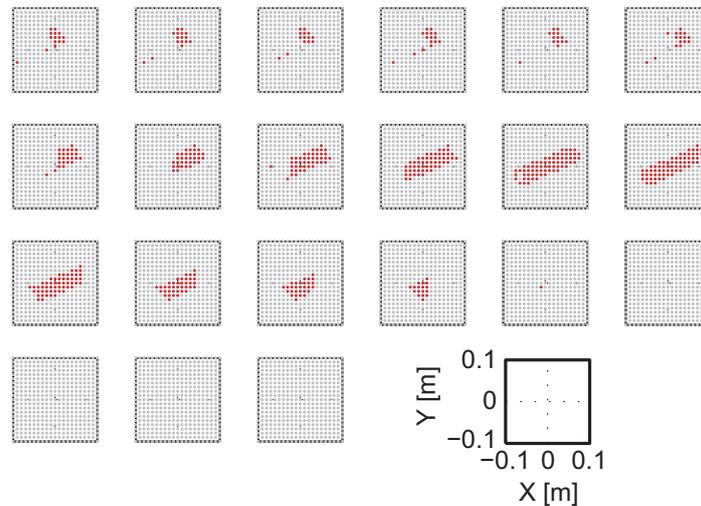


Fig.5.10 Hitting failed with measurement errors in most case.

び Fig.5.15 に示す。これらの図より、それぞれの状態が線形に回帰することが考えられる。このため、誤差パラメタと運動調節パラメタとをそれぞれ用いて打撃時刻および打撃部位を回帰した。この回帰における R^2 値を Fig.5.16 に示す。図の左が誤差パラメタで回帰した場合の値、右が運動調節パラメタで回帰した場合の値である。これより、誤差が生じた場合に、それに応じた打撃時刻と打撃時刻における打撃部位の状態が分かれば、そこから運動調節パラメタを計算できるモデルを構築できることが分かった。

5.2.2 誤差が打撃結果に与える影響

跳躍打撃動作において、ボールの位置推定における計測誤差、運動学習における近似誤差、実世界の不確かさから発生する運動実行誤差など、計画した運動と実行する運動の間に誤差が生じる。打撃によって所望の位置にボールを落下させる場合、これらの誤差の修正が必要である。誤差を修正する場合に、運動を基準としてどの要素の誤差を減らすべきかを知る必要がある。このため、打撃部位の状態に備わる計画との誤差を場合に、どの要素が打撃結果の結果をどう変えるかを解析した。

解析手順について述べる。まず、特定の望ましい打撃時刻、ロボットの状態、ボール軌道、および打撃結果を1組抽出する (Fig.5.17)。次に、打撃時刻、およびロボッ

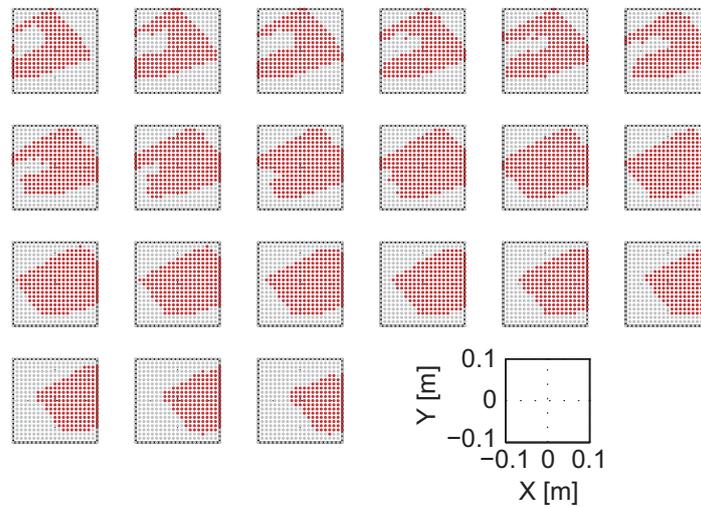


Fig.5.11 Adjusted hitting succeeded with measurement errors in most cases.

トの状態を変化させ、同一のボール軌道軌道に対する打撃結果の変化を調べる。ここで打撃結果の計算には、前述した衝突モデルを用いた。ロボットの状態に備わる要素として、打撃部位の速度、および姿勢を選択し、誤差を想定した上でそれらを変化させた。打撃結果として、落下目標位置および打撃後にボールが落下するまでの時間について計画との誤差を調べた。

結果について以下に述べる。まず、打撃時刻に誤差が生じた時の結果を Fig.5.18 に示す。打撃時刻が遅れるほど、打撃後のボール滞空時間は長くなった。打撃時刻の誤差が大きいほど、ボールの着地位置の誤差が大きくなった。さらに、この誤差は打撃時刻が遅れた場合により大きくなった。打撃時刻の誤差による打撃位置の変化の大きさは、ボールの速度に応じて変化した。打撃時刻が遅れるほど打撃後のボール滞空時間が長くなった理由として、打撃部位の高さが低くなることが考えられる。

次に、打撃速度に誤差が生じた時の結果を Fig.5.19 に示す。打撃速度の x 成分および z 成分が増加した場合、および打撃速度の y 成分が減少した場合には、打撃後のボールの滞空時間は長くなった（上段）。ボールの着地位置の誤差は、速度の誤差が大きくなるほど大きくなった（下段）。また、打撃速度の x 成分および z 成分が増加した場合、打撃速度の y 成分が減少した場合と比較して大きかった。打撃速度の成分ごとに速度の増減に対するボール滞空時間の増減の傾向が変化した理由として、打撃

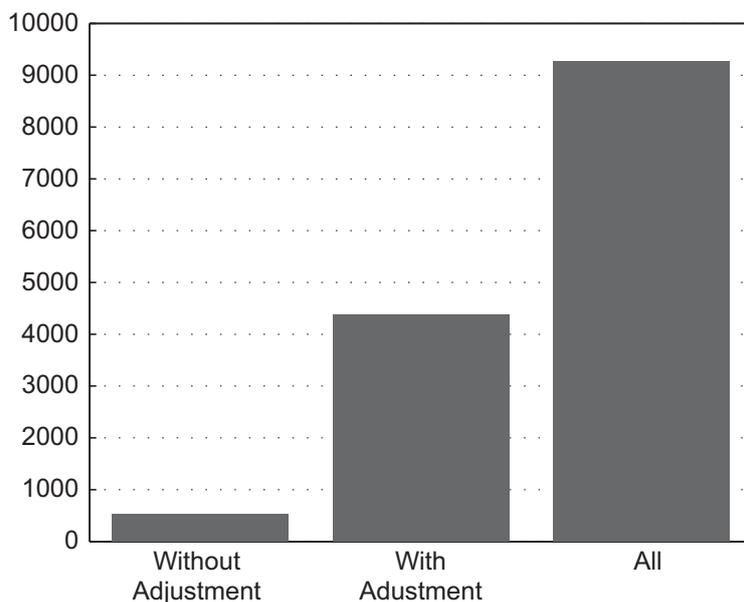


Fig.5.12 8.4 times of number of errors could be hit with adjustment.

のダイナミクスにおいて、打撃面と各速度成分の関係性が重要であることが考えられる。すなわち、打撃面に垂直なベクトルとなす角度が小さいベクトルを備えた成分では打撃の結果に大きな影響を与え、この角度が大きいベクトルを備えた成分は結果に与える影響が小さいと考えられる。

最後に打撃部位の姿勢に誤差が生じた時の結果を Fig.5.20 に示す。面に垂直なベクトルのピッチ角が θ 、ロール角が ϕ である。 θ が増加するにつれて、滞空時間は長くなり、ある値を越えると低下した（上段左）。 ϕ が増加するにつれて、滞空時間は短くなった（上段右）。また、 ϕ に負の誤差が出た場合にボールの着地位置の誤差が大きかった（下段）。これは、0.05 rad すなわち 3 deg. 程度の姿勢変化が生じた場合に、ボールの着地位置が 0.5 m を超過する可能性を示唆している。姿勢がボールの着地位置の結果に大きな影響を与える理由として、打撃のダイナミクスにおいて、打撃部位の面の向きが重要であることが考えられる。

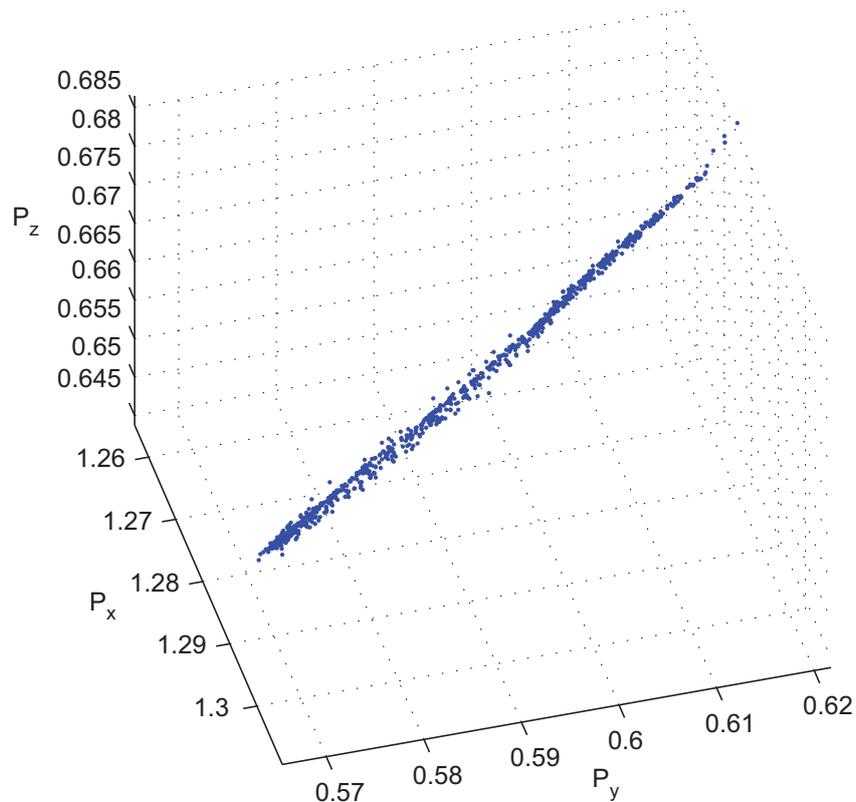


Fig.5.13 Linear relationships in hitting parts' positions.

5.2.3 動作生成と運動調節の同時学習法

以上の実験から、腕付二脚ロボットにおいても提案する調節手法が有用であると分かった。実際に運動を調節した場合に、どの程度の誤差を補償できるかを調べるため、腕付二脚ロボットモデルを用いた誤差補償のシミュレーションを行った。この実験について以下に述べる。

前章で提案した動作学習・生成手法と運動調節法は学習を必要とする。このため、これらを独立して行った場合、膨大な試行数を必要とし、跳躍打撃動作のような身体に大きな負荷を与える動作へ適用することが難しい。このため、運動指令、経過時間、状態の関係性と、運動指令切り替え時刻の修正によって変化するそれらの関係を

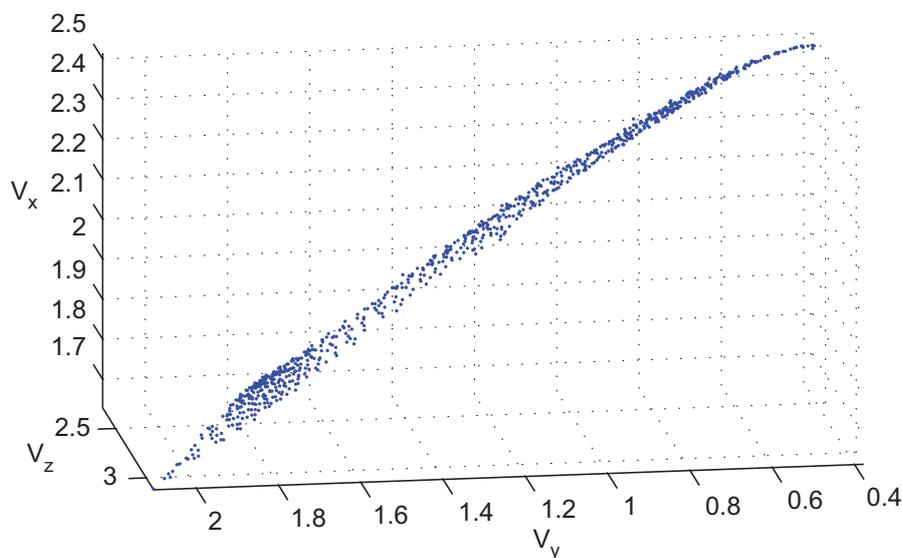


Fig.5.14 Linear relationships in hitting parts' velocity.

同時に学習することを提案し、この同時学習が可能であることをシミュレーションによって確認した。

実験は、前節で述べた腕付二脚ロボットの跳躍打撃動作学習と同様の方法で行った。学習では、学習実験と同じモデル、同じ動作生成法を用いて、運動指令切り替え時刻と運動指令を変更した時の運動の変化から運動指令、経過時間、状態の関係性、運動指令切り替え時刻の修正量の関係性を学習し、認識誤差によって目標手先位置が変化した場合に、動作切替時刻を適切に選択できるかを評価した。訓練ではまず、収集した運動から設定した訓練数の運動を選択し、分割順モデルで運動指令と運動指令切替時刻が各時刻の手先位置に与える影響を学習させた。訓練における手先軌道の図 (Fig.5.21) から、軌道類似性に基づいて軌道群が分割できたことが分かる。訓練において、軌道類似性に基づいて分類された運動指令と運動指令切り替え時刻の図 (Fig.5.22) から、これらによって張られる空間がクラスタごとに分割されることが分かる。

次に評価では、誤差が認識される以前の手先目標位置および切替時刻として、訓練試行として与えられなかった運動を 1 つ 選択して切替時刻を選択し、打撃時刻を 260–280 [ms] の範囲から 1 つ 選択して手先位置を選択した。続いて、誤差を認識し

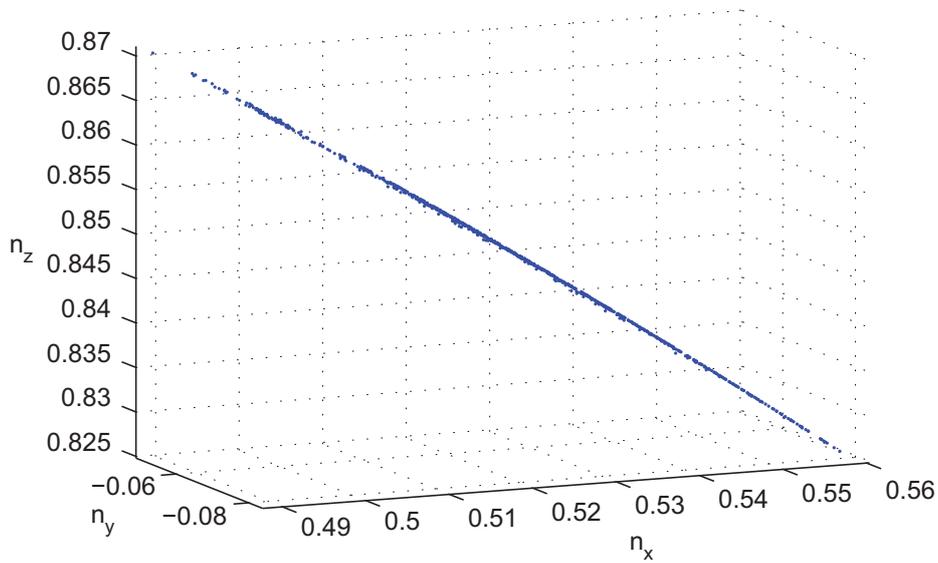
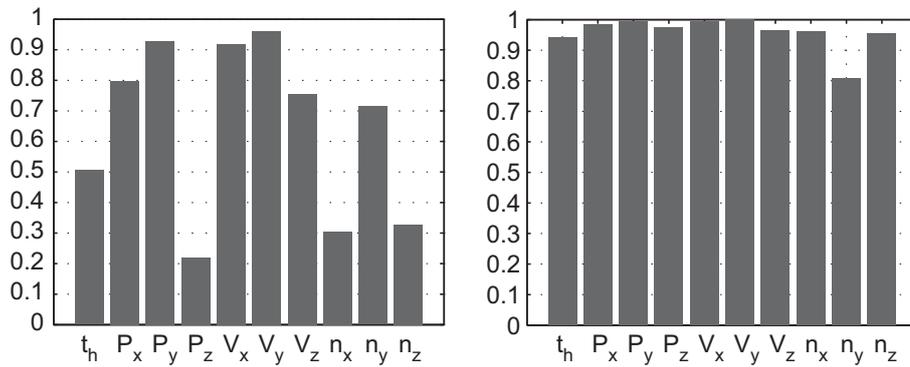


Fig.5.15 Linear relationships in vectors orthogonal hitting surface.

Fig.5.16 R^2 of regression using adjustment parameters are higher than using errors.

た後の目標手先位置として、訓練試行として与えられず、誤差が認識される以前の手先目標位置生成に使われなかった運動を誤差が認識される以前の手先目標位置生成に使われた運動と同一のクラスタから1つ選択し、選択された運動における誤差が認識される以前の手先目標位置と同一の時刻における手先位置を選択した。さらに動作生成では、誤差が認識される以前の手先目標位置から運動指令を選択し、選択された運動指令において誤差補償を行う運動切替時刻を計算した。計算では、選択された運

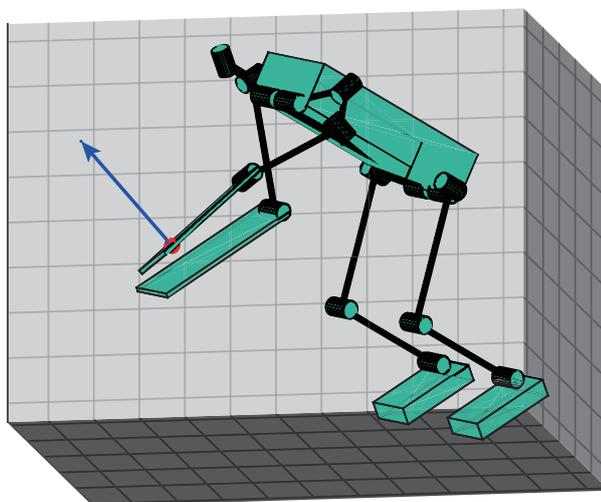


Fig.5.17 Posture of the robot model at hitting.

動指令に加えて異なる運動切替時刻を与え、各時刻における手先位置を予測し、目標手先位置との距離が最も近い手先位置を探索し、その手先位置を生じる運動指令切替時刻を選択した。選択した運動指令と切替時刻から生成された運動における手先位置の差を誤差補償を行った場合の誤差とし、切替時刻を変更しなかった場合の手先位置の誤差と比較した。訓練試行数は 10 に設定し、訓練、予測、実行、評価を 100 回反復した。

実験結果について以下に述べる (Fig.5.23)。図は、右股関節の運動指令を標準的な運動指令を $-0.2-0.2$ [MPa] の範囲で変化させ、運動指令切替時刻を $-10-10$ [ms] の範囲で変化させた時の、誤差補償を行わなかった場合と行った場合の手先位置誤差の平均と標準偏差を表している。図から、10 回の訓練を行い、誤差補償を行うことで誤差平均が 55 mm から 32 mm へ 42% 減少することが分かる。この結果から、提案する誤差補償方法を腕付脚式ロボットに適用して誤差を補償できることが分かった。

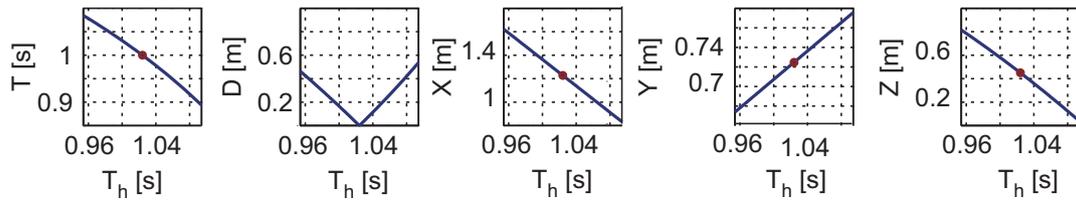


Fig.5.18 Larger changes of hitting positions caused by timing errors than on ball landing positions and ball flying period after hitting. Blue lines show results with timing errors. Red points show results without the error.

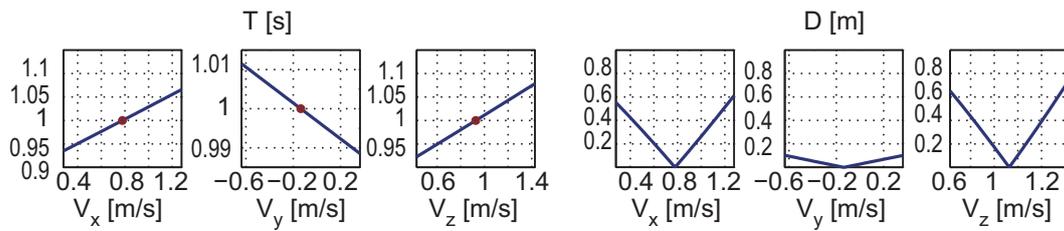


Fig.5.19 Linear relationships between errors of hitting part's velocity at hitting and ball landing positions and ball flying period after hitting. Blue lines show results with velocity errors. Red points show results without the error. Ball landing position errors are smaller than

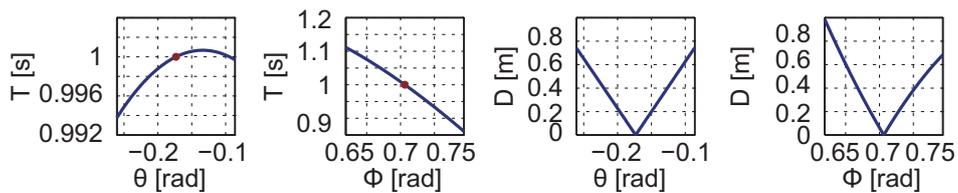


Fig.5.20 Posture errors occurred larger changes of ball landing positions are occurred than timing errors and velocity errors. Blue lines show results with the hit parts postural errors. Red points show results without the error.

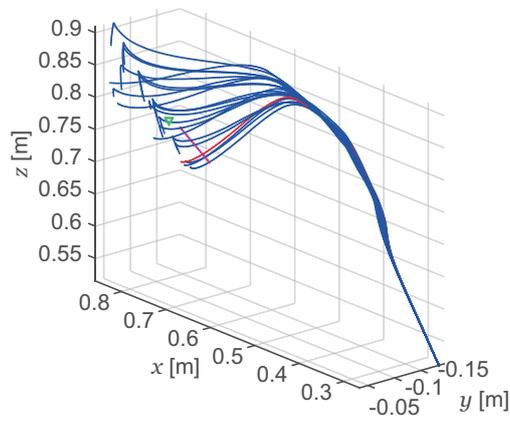


Fig.5.21 Adjustment target positions by learning.

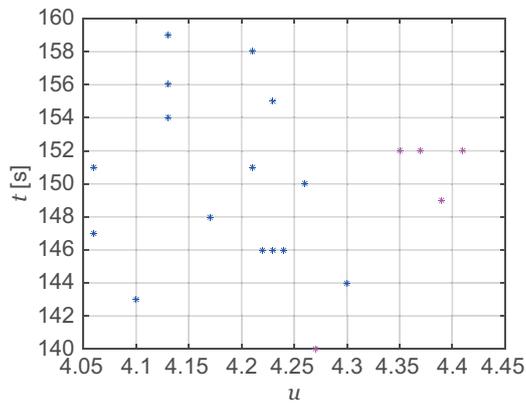


Fig.5.22 Clustered output commands and switching time.

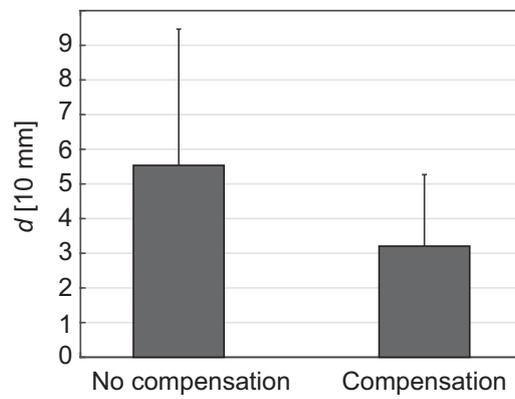


Fig.5.23 Effects of error compensation. Mean and standard deviation of distance between target position and hand position.

第6章

腕付脚式ロボットの跳躍打撃動作 実験

本章では、これまでに提案した各手法を統合し、有用性を実証する最終実験について述べる。まず、提案した設計法を用いて腕付脚式ロボットを開発し、異なる軌道で飛来するボールに対して異なる跳躍打撃動作が行える運動性能を有することを実験的に示す。次に、提案した動作学習、生成手法を用いてこのロボットに跳躍打撃動作を学習させる。さらに、その結果を未知の軌道で飛来するボールに対する軌道推定と合わせることで、実時間で打撃位置と運動開始タイミングを決定し、跳躍打撃を実現する。運動生成に当たっては、提案した運動調整法による誤差の補償も含んでいる。

従来の方でこのような状況適応的な運動を計画し、実行する場合、予測したボールの運動から目標手先位置と到達時間を計算し、最大関節出力、最大速度、自己接触の回避、床の滑りの防止など、様々な制約を満たす軌道を反復的に計算して求め、時々刻々の状態が計画した軌道に追従するように制御を行って目標を達成する。一方、本研究では、適切なタイミングで目標の手先状態を満たすことのみを考慮し、目標状態からそこに至る指令と時間を計算によって求めることに注力し、これを達成するのに十分かつ効果的な身体として空気圧駆動系を選択した。この戦略に基づいて、ここまでに、即応的なダイナミック運動を行うロボットのための空気圧駆動系設計法、目標状態から指令を直接計算する動作学習、生成法、および空気圧ロボットのための運動調節法を提案した。このような、提案した即応的跳躍打撃動作を行う空気圧ロボットの構成法の有用性を、実機での跳躍打撃動作実現を通じて以下に示す。

6.1 提案身体設計法の要求充足性検証

本節では、提案する跳躍打撃動作を行うロボットの空気圧駆動系の評価実験について述べる。まず、評価のために開発したロボットの詳細について述べる。次に、異なる跳躍打撃動作で異なる軌道で飛来するボールを打撃する性能評価実験について述べる。

6.1.1 空気圧腕付脚式ロボットの開発

本研究で提案した軽量大ストローク空気圧駆動系を用いて跳躍打撃動作を行うロボットを開発し、提案した設計法が跳躍打撃動作を行うロボットに有用であることを確認した。

跳躍打撃実験を通じて本論文で提案した手法の妥当性を示すため、跳躍打撃ロボットを開発した。跳躍打撃動作は大きな加速度を生じ、予期せぬ環境や自己との衝突、接触が生じるため、故障等の危険を最小限に止めることが重要である。このため、自由度数を必要最小限に設定し、部品点数や重量を削減し、軽量な身体を設計する必要がある。そこで開発したロボットの設計図 (Fig.6.1) から分かるように、ロボットは他の腕付二脚ロボットと比較して、単純な身体構造を備えている。ロボットは、左右の股関節と右肩にそれぞれピッチとロールの2自由度、左右の膝にそれぞれ2自由度の全8自由度を備えている (Fig.6.2)。脚の6自由度は減速機を用いて出力を高めており、脚のシリンダ内径は40 mm、腕のシリンダ内径はピッチ軸が32 mm、ロール軸が25 mmである。これらの設計パラメタは3章の設計法に基づいて導出した。関節のモーメントアームは20 mm、減速比は2.5であり、コンパクトな関節を有している。ロボットはアクチュエータとして8本の構造一体型空気圧ケーブルシリンダを備えており、8つの関節はこのシリンダで互いに接続されている。一般的な二脚式ロボットと比較して、球形状の足を備え、足首関節を有しないことが特徴である。足底に面を構成すれば、特定の初期姿勢に対する安定性を増すことが可能である。しかし、選択できる初期姿勢が限定的になり、面の端での回転が指令に対する運動の変化に不連続性をもたらし、学習困難な指令—運動関係になるおそれがあったため、球状の足先を選択した。この形状のために、継続的に立位姿勢で静止させることが困難で

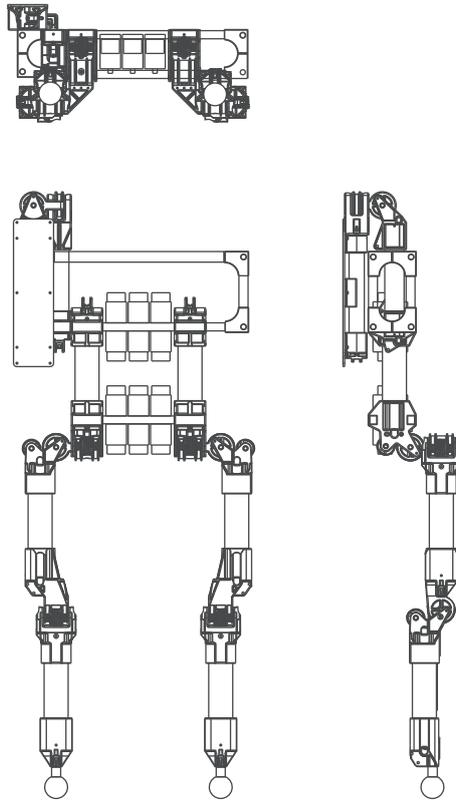


Fig.6.1 Drawing of the jump hit robot.

あるが，環境からの支えによる初期姿勢の維持によって，同一の初期姿勢から即応的全身ダイナミック動作を行うことが可能である．加えて，足が球形状であるため，下腿の方向に関係なく安定して床との摩擦を生じさせることが期待できる．この足の材料には床面との摩擦を増加させるため天然ゴムを利用した．シリコンゴムは造形が容易である．しかし，摩耗による劣化が早いと考え，自動車のタイヤ等に用いられる天然ゴムを採用した．ロボットは腕を搭載しており，腕部の板でボールを打撃できる．肩が2自由度であるため，空中での腕の関節制御のみによって打撃時刻の腕の面を任意の角度に向けることは困難である．しかし，任意位置へ腕を振り上げること，および所望の腕の面の向きを満たす跳躍を行い，所望の面の向きで打撃することが可能である．

開発したロボットの外観 (Fig.6.4) から分かるように，ロボットは5つのアルミタンクを備えており (Table6.1)，外部からの圧縮空気供給だけでなく，内蔵するタンク

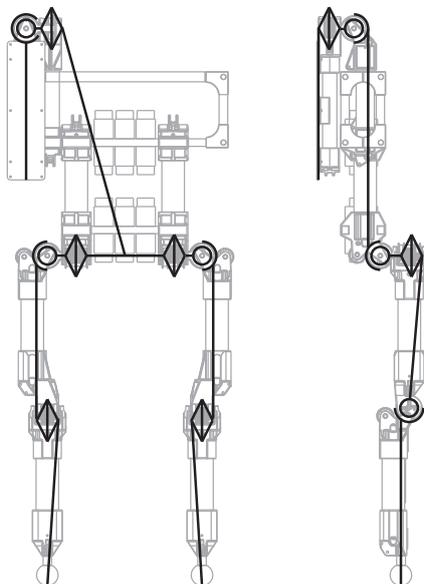


Fig.6.2 Joint composition of the jump hit robot.

の空気を用いて運動することも可能である。これらのタンクは外部からの圧縮空気供給で駆動する際に供給圧力低下を減ずる効果もある。ロボットは12の圧力比例制御弁を備えている (Fig.6.3)。腕を駆動するシリンダの各チャンバ，左右脚を伸展させる方向に力を発揮するチャンバ，および左右脚を外転させる方向に力を発揮するチャンバは互いに別のバルブに接続しており，脚を屈曲させる方向に力を発揮するチャンバ，および右脚を内転させる方向に力を発揮するチャンバがそれぞれ左右1つずつのバルブで駆動される。CPUから目標圧力指令がバルブに送られ，バルブがその圧力に従うようにチャンバの内圧を制御する。

ロボットはセンサとして，16個の圧力センサを各チャンバとバルブとの途中に備え，8個のポテンシオメータを関節軸上に備える。電源は，CPUを駆動する5V，ポテンシオメータを駆動する5V，およびバルブと圧力センサを駆動する12Vがそれぞれ外部から供給される。CPUはLANケーブルを介して外部と通信する。これらの電源ケーブル，LANケーブルはコネクタと環境との間でロボットに固定し，コネクタの損傷を防いだ。十分な厚みと硬さをもつことが打撃面には必要とされるため，打撃する腕の面にはシリンダの上にナイロン部品を介して厚さ3mmの亚克力板が取り付けられている。予期せぬ環境との衝突によるバルブの破損を防ぐため，ロボット

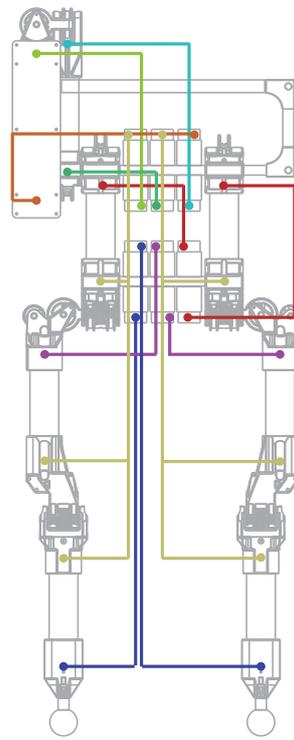


Fig.6.3 Air piping of the robot.

の前面にはスタイロフォームが取り付けられている。

6.1.2 異なるボール軌道に対する跳躍打撃実験

開発したロボットを用いた跳躍打撃実験を行った。まず、実験設定について述べる。具体的な状況として、ロボットが飛来する物体を知覚し、その軌道を予測し、落下を防ぐために跳躍し、打撃する状況を想定した。実験では物体として直径 10cm のウレタンスポンジボールを用いた。まずはロボットが跳躍打撃を行える身体性能を十分に備えていることを確認するため、ボールの軌道に応じた運動開始時刻と運動指令を試行錯誤で決定した。実験条件の統制のために投球機械 (Fig.6.5) から投球した。初期姿勢は、ロボットの体幹 4 箇所固定された紐をクレーンを通して固定台 (Fig.6.6) へ接続することで同一の姿勢を取らせた (Fig.6.7)。固定台には空気圧シリンダが搭載されており、所望のタイミングでロボットの固定を解除することが可能で

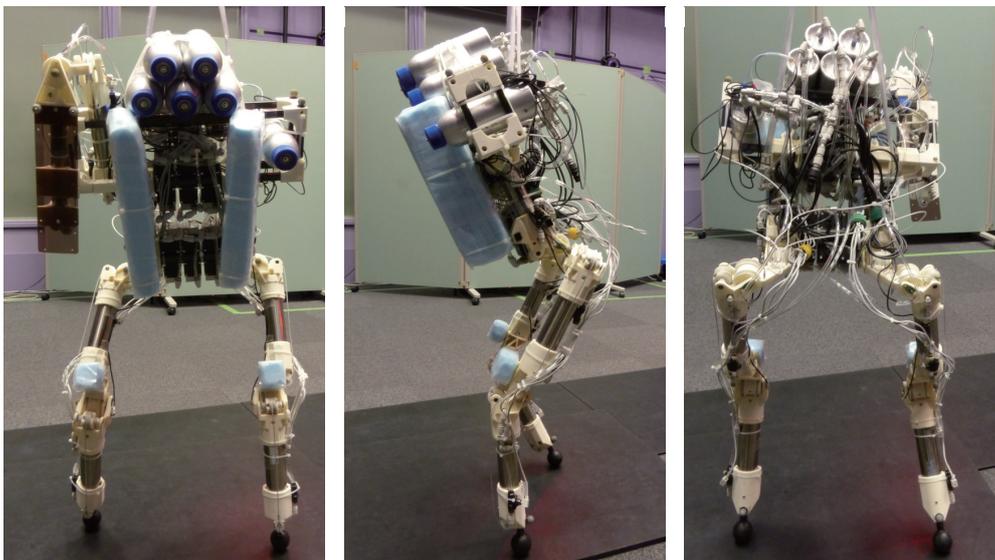


Fig.6.4 Appearance of the jump hit robot.

Table6.1 Specification of the two legs robot.

Actuator	Structure-integrated pneumatic cable cylinders x 8
Valve	Tecno basic (Hoerbiger) x 12
Potentiometer	SV01 x 8 (Murata Manufacturing Co., Ltd.)
Pressure sensor	PSE530 x 12 (SMC Inc.)
Air supply	Aluminum tanks (550 ml) x 4, External tanks

ある。

次に、実験手順について述べる。ロボットとボールの運動を光学式モーションキャプチャ (VICON, 120Hz) で計測し、床反力を 1560Hz で計測した。打撃に用いるボールを反射材で覆い、光学式モーションキャプチャからボールの位置を計測した。跳躍打撃動作後のロボットと環境との衝撃を緩和するため、床にロボットの手先が触れない長さの紐を、ロボットの運動を阻害しないように注意してロボットに取り付け、ク

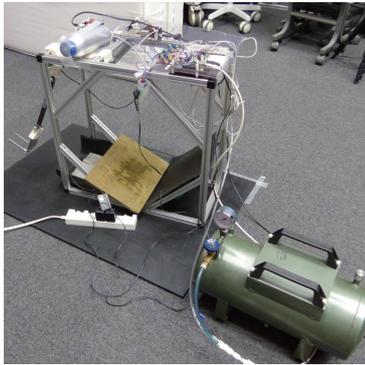


Fig.6.5 Appearance of a pitching machine.



Fig.6.6 Appearance of a supporting base.

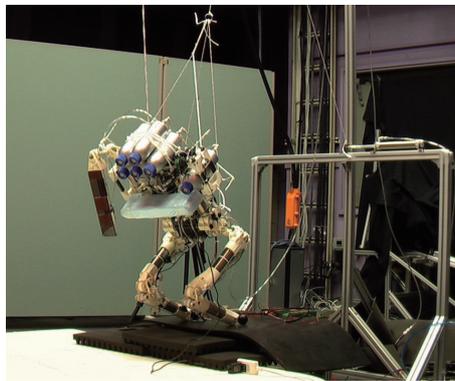


Fig.6.7 Initial posture of the robot before jump hit motion.

レーンから吊るした。ロボットの故障確率を下げるため、床にマットを敷き、マットへ落下させるために踏み台を作製して、その上から跳躍させた。四肢末端の速度を落とすため、伸展位で落下するような指令を選択し、空気の粘弾性によって衝撃を緩和するために、全ての圧力指令値の最小を 0.05 MPa に設定して、全てのチャンバに圧縮空気が供給されるようにした。

続いて、実験結果について述べる。実験では、正面から飛来するボール、および右斜め前から飛来するボールの異なるボール軌道に対してロボットが異なる動作を行い、跳躍し、打撃する動作が見られた (Fig.6.9)。ボール軌道と手先軌道を表した図 (Fig.6.10) から、ロボットが異なるボール軌道に対して異なる軌道で打撃を行ったことが見て取れる。ロボットはこれらの運動において世界座標系に対して異なる方向を

向いた初期姿勢から運動を開始した。このため図では、ロボット体幹の頂点後方左右に付けたマーカ位置を用いて、それらのマーカがY軸上に配置され、マーカの中点が原点になるように座標変換を行った。異なる軌道で飛来するボールに対して異なる運動でロボットが跳躍打撃動作を行い、打撃に成功したため、提案した設計手法で即応的な跳躍打撃動作を行う腕付脚式ロボットの身体が設計できると結論づけた。

6.2 提案する動作生成法と調節法の有用性検証

提案する動作学習、生成手法および運動調節法を実機による跳躍打撃動作において検証した。

6.2.1 跳躍打撃動作を行うロボットの情報処理

跳躍打撃動作においてロボットは、実時間でボールの位置を認識し、軌道を推定し、運動を予測し、打撃位置を決定し、運動指令と運動開始タイミングを決定し、運動を調節して目標を達成する。これら情報処置の実装について、以下に詳細を述べる (Fig.6.11)。

跳躍打撃動作における運動指令の図 (Fig.6.12) に示すように、運動指令は5つの局面に分割される。以下で述べる情報処理は運動指令や運動開始タイミングを決定するが、これとは独立に、動作開始からの時刻に基づいて局面が変わるごとに運動指令をロボットへ送るシステムが並列していることに注意されたい。ロボットの情報処置は大きく分けて4つの段階に分けられる。第1段階では、ボールを認識する。このためにシステムは、モーションキャプチャシステム (OptiTrack Prime 13W, Natural Point) より送られてくるマーカ位置の集合から、事前に与えられた領域にあるマーカを検索し、そのようなマーカがあった場合、そのマーカ位置をボール位置だとして、その後ボールを追従する。

第2段階では、ボールの位置を推定し、軌道を推定し、運動を予測し、打撃位置を決定し、運動指令を決定する。ボールの位置推定では、モーションキャプチャシステムから送られてくるマーカ位置の集合から、前の処理で推定したボールに最も近い位置のマーカを選択し、そのマーカ位置をボール位置として記憶する。ボールの軌道推定では、記憶した各時刻のボール位置に、水平面上の成分には時間の一次関数を、鉛

直方向の成分には時間の二次関数をそれぞれ当てはめる。この当てはめには最小二乗法を用いた。ボールの運動予測では、軌道推定で計算された関数の係数、および現在のボール位置から、未来の各時刻におけるボール位置を計算する。具体的には、導出した一次関数および二次関数に未来の時刻を代入することで、未来のボール位置の各成分を得る。打撃位置の決定では、予測した未来のボール位置の各点と、後述する打撃位置の候補点との距離を計算し、ボール位置と手先位置の組み合わせの中から、それらの距離が設定された値以下になる組み合わせを探索する。この組み合わせとして、ボールが打撃される予測位置 p_{BALL} 、および手先が打撃時に到達する予測位置 p_{HAND} が得られる。さらに、 p_{BALL} からボールが打撃されるまでの時間 t_{BALL} 、および p_{HAND} から手先が打撃時の手先位置に到達するまでの時間 t_{HAND} が計算される。計算されたこれらの時間を用いて動作開始を決定する。具体的には、モーションキャプチャシステムの位置取得周波数を f として、 $t_{\text{BALL}} < t_{\text{HAND}} + 1/f$ を満たした場合、動作を開始し、情報処理を第3段階に進める。

第3段階では、跳躍局面終了時の運動指令切り替え時刻を修正する。新しいボールの位置を取得するたびにボールの運動予測を更新し、後述する運動指令に対応した打撃位置の候補点との距離を計算し、最新のボール予測位置に対して最近接する手先位置候補を選択する。選択された手先位置候補から、それに対応する運動指令切り替え時刻を選択し、運動指令切り替え時刻を更新する。現在時刻が、跳躍局面終了時の運動指令切り替え時刻を越えた時に、第3段階を終了し、情報処理を第4段階に進める。

第4段階では、現在時刻から現在の運動局面を推定し、局面が切り替わった場合に圧力指令を変更することだけを行う。本実験においてこの第4段階は離陸とほぼ同時に開始されるが、この段階を原理上は打撃が行われる直前にすることも可能である。

6.2.2 カメラを用いた軌道予測性能の評価実験

ロボットが跳躍打撃動作を行うためには、飛来するボールを計測し、ボールの位置を推定し、軌道を予測する必要がある。これらを行う視覚情報処理系を実装し、評価実験を行った。

情報処置の流れについて説明する (Fig.6.13)。まず、ボール位置の計測方法について述べる。カメラとして、2台の PlayStation Eye (SONY) を用いた。フレームレート

は 60 fps に設定し、640x480 の画像を取得した。これらのカメラに接続されたノート PC で取得した画像を処理し、画像内のボールの位置を計算した。天井の照明を調整し、スピードカメラ用の照明をカメラ側からボールに当てて認識精度を高めた。画像処理について述べる。OpenCV を導入し、背景差分から移動体であるボールを抽出した。移動領域の重心からボールの存在位置を推定し、この重心周辺に円検出を用いることでボールの中心位置を計算した。移動領域の重心計算と円検出を併用したのは、誤検出を避け、画像処理の情報量を減らして高速化するためである。

ノート PC はそれぞれ画像処理を行って画像中のボールの位置を計算し、それをデスクトップ PC へと TCP/IP 通信で送信した。デスクトップ PC は、各カメラ画像上のボール位置から世界座標系におけるボール位置を計算した。カメラ画像のボール中心位置から世界座標系におけるボール位置への変換は、VICON を用いてボールの位置とカメラの見えを計測し、これらの対応関係を記録し、変換行列を推定し、その行列を用いて行った。

各時刻におけるボール位置から、水平面では時間に対して位置が線形に変化し、鉛直方向では位置が時間の二次関数として変化すると仮定し、最小二乗法を用いてボールの軌跡を推定した。ボールの軌跡を表す係数と現在時刻から将来におけるボールの位置を予測した。以上が、ボールの位置推定と予測の方法である。

この推定方法の有用性を検証するため、ロボットによる打撃実験を行った。ロボットは台から紐で牽引して立位姿勢を取り、同一指令で腕を振り上げる動作を行わせた (Fig.6.14)。試行錯誤によって動作開始タイミングを選択した打撃を計測し、その動作におけるボール軌道から打撃位置を保存した。

腕を振り上げる動作における動作開始からの腕の位置変化を VICON で計測し、ボール位置の変化を予測して保存した打撃位置にボールが最近接する時間を予測し、タイミングを合わせて打撃させた。結果として、視覚系を用いたロボットによる打撃動作が確認された (Fig.6.15)。しかし、打撃の再現性は確認されなかった。これは、ロボットの打撃動作が 1 通りであったため、投球機械によって投げられたボールの軌道の変化に対応できなかったことが理由だと考えられる。加えて、カメラによるボール位置推定では十分な精度で予測できなかったことが再現性を確認できなかった理由だと考えた。このため、次項の実験では、光学式モーションキャプチャを用いてボールの位置を計測した。

6.2.3 跳躍打撃動作の学習・生成・調節実験

提案した学習手法を用いて前述したロボットに跳躍打撃動作を学習させ、実時間での認識、判断、調節を含む跳躍打撃動作を行わせた。これについて以下に詳細を述べる。

まず、代表的な跳躍打撃動作を試行錯誤で生成し、代表的な動作に類似した動作を行わせた (Fig.6.17)。ここで、典型的な動作を探索する時に、膝の進展が十分に行われた場合に、十分な移動を伴う跳躍が見られたため、跳躍打撃動作における内圧変化 (Fig.6.16) から見て取れるように、膝の給気を股関節よりも先行させた。類似した動作を生成するために、跳躍における両膝の目標圧力値を両膝の値の合計値が一定になるように、無作為に変化させた。同時に、跳躍局面の時間を代表的な運動における時間との差が $-10-10$ [mm] の範囲で無作為に変化させた。

類似した動作における手先軌道を収集した (Fig.6.18)。提案手法を用いて他の軌道で通過した手先位置から、その位置を生み出した運動指令と跳躍時間を予測した。図には、分類された手先軌道、および収集した軌道から学習し、予測した、各運動指令と運動指令切り替え時刻から、運動開始後 410 ms 後に到達する手先位置が示されている。これらの手先到達位置を用いて打撃位置決定を行った。分類では、手先軌道ベクトルを用いて、距離平均が最小となるように 2 クラスタに分類した。分類によって、運動指令と運動指令切り替え時刻の空間が分割された (Fig.6.19)。

視覚系を用いた跳躍打撃動作実験について述べる。実験では、前述したように光学式モーションキャプチャを用いた (Fig.6.20)。実験では、異なる軌道で飛来するボールに対して、跳躍打撃動作が行われ、打撃に成功した (Fig.6.23)。この連続写真から、異なる軌道のボールに対して、ロボットが異なる運動を行い、跳躍、打撃したことが見て取れる。加えて、手先とボールの軌道から (Fig.6.24)、ボール軌道が互いに大きく異なること、打撃位置が異なること、打撃に至る手先軌道がそれぞれ異なることが見て取れる。

左から飛来するボールに対する跳躍打撃動作における運動指令切り替え時刻の変化 (Fig.6.25) から、ある時刻から運動指令切り替え時刻が切り替わったことが分かる。各時刻におけるボールの軌道予測を示した図 (Fig.6.26) から、ボールが到達するにつれて予測軌道が変化し、特に頂点を越えた後に予測軌道が大きく近づくことが分か

る。跳躍打撃動作における運動調節は、このような予測誤差の補償に効果を与えたと推測される。

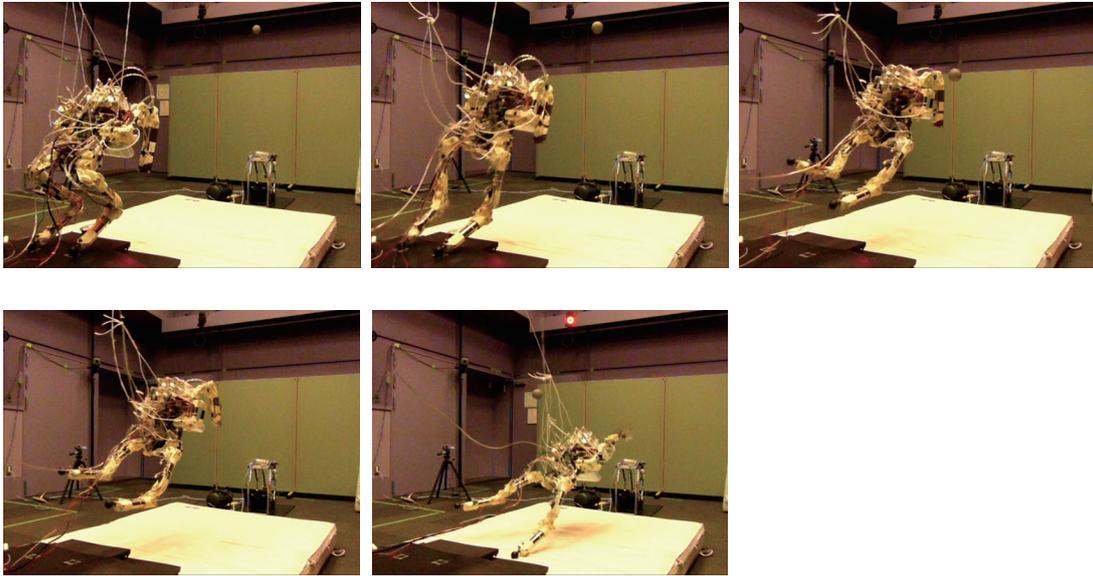


Fig.6.8 Snapshots of jump hit motion (center).

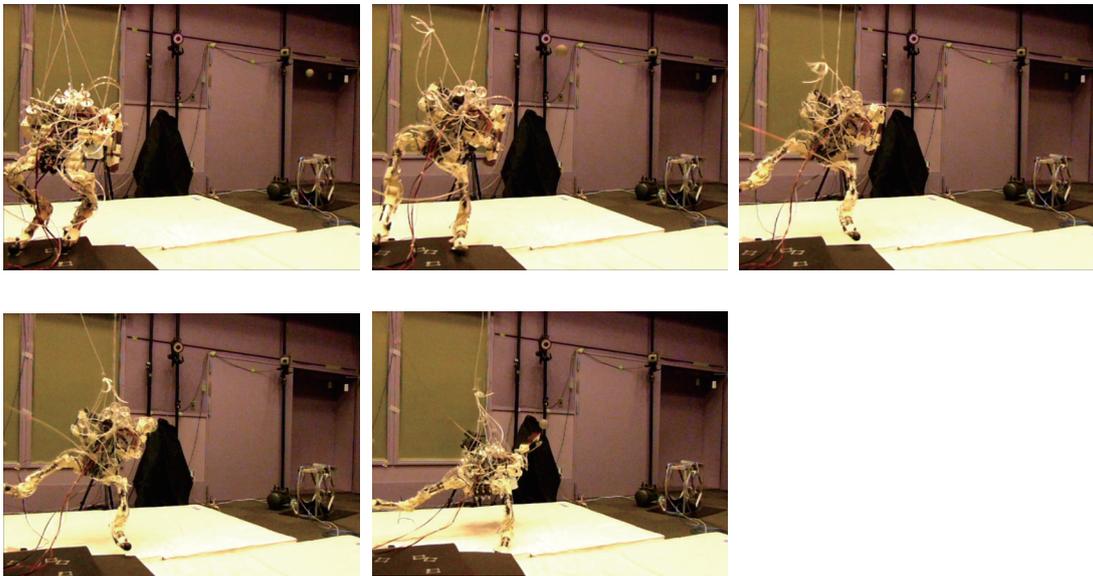


Fig.6.9 Snapshots of jump hit motion (right).

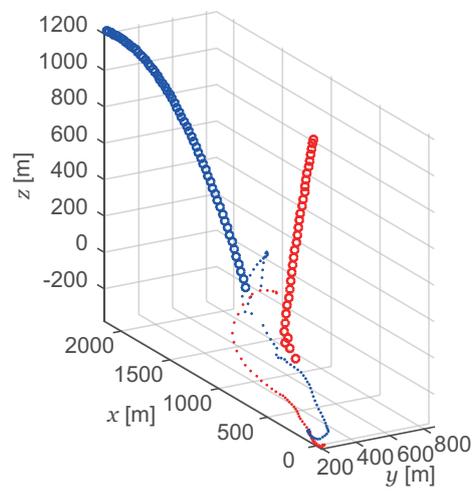


Fig.6.10 Different hand and ball trajectories in jump hit motion.

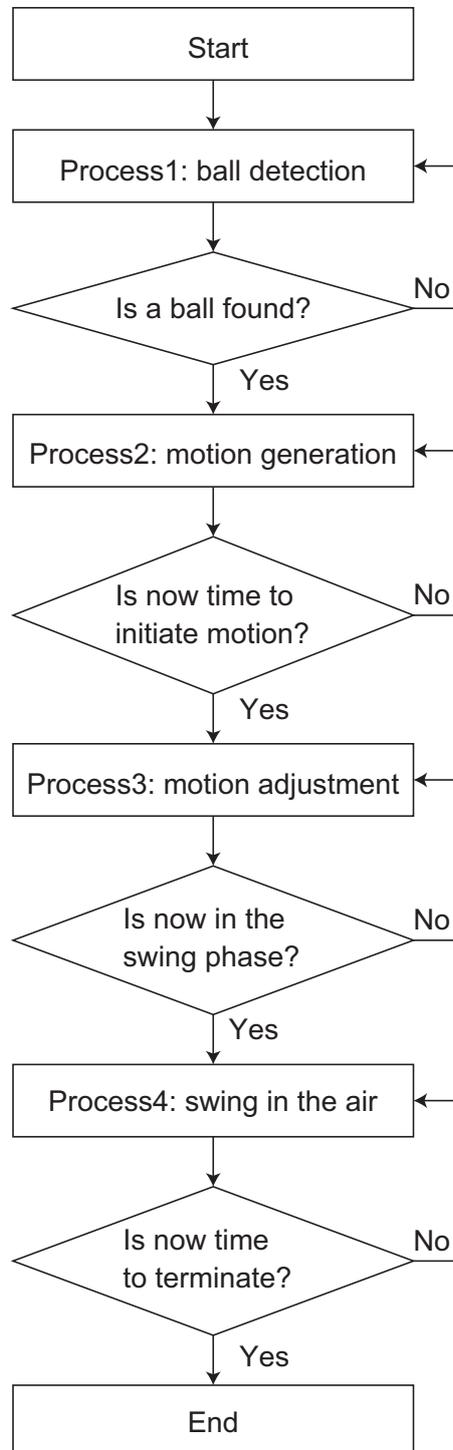


Fig.6.11 Flow chart of jump hit motion.

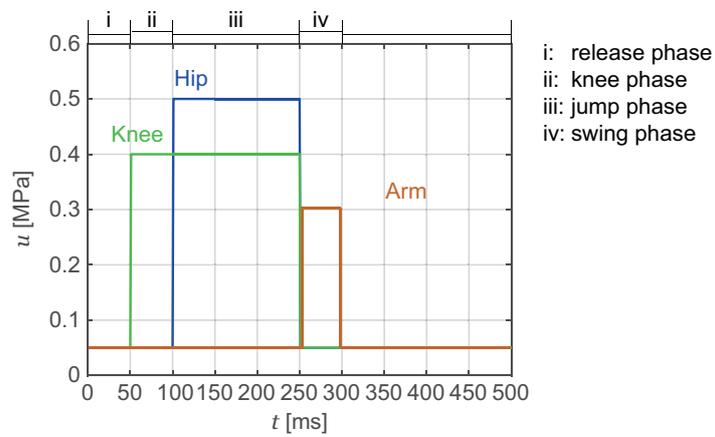


Fig.6.12 Output commands and phase structure of jump hit motion.

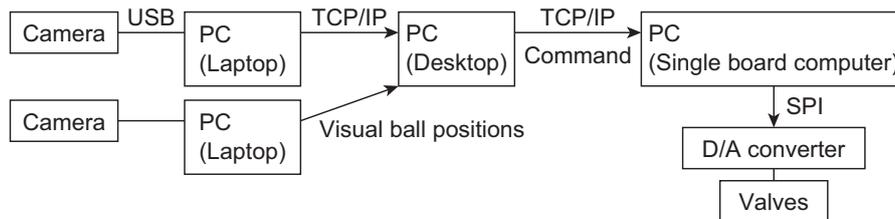


Fig.6.13 Information processing flow with cameras.

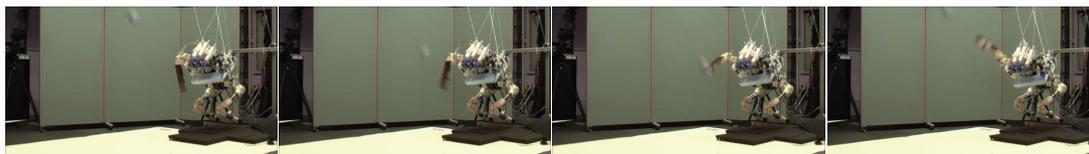


Fig.6.14 Snapshots of stand hit motion in training.

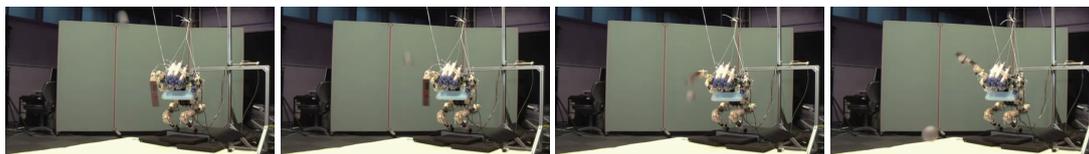


Fig.6.15 Snapshots of stand hit motion in tests.

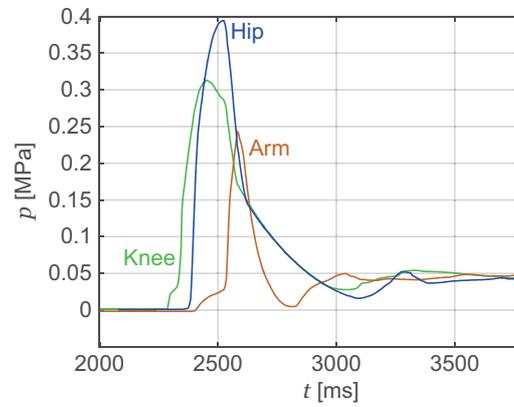


Fig.6.16 Pressure in chamber in jump hit motion.

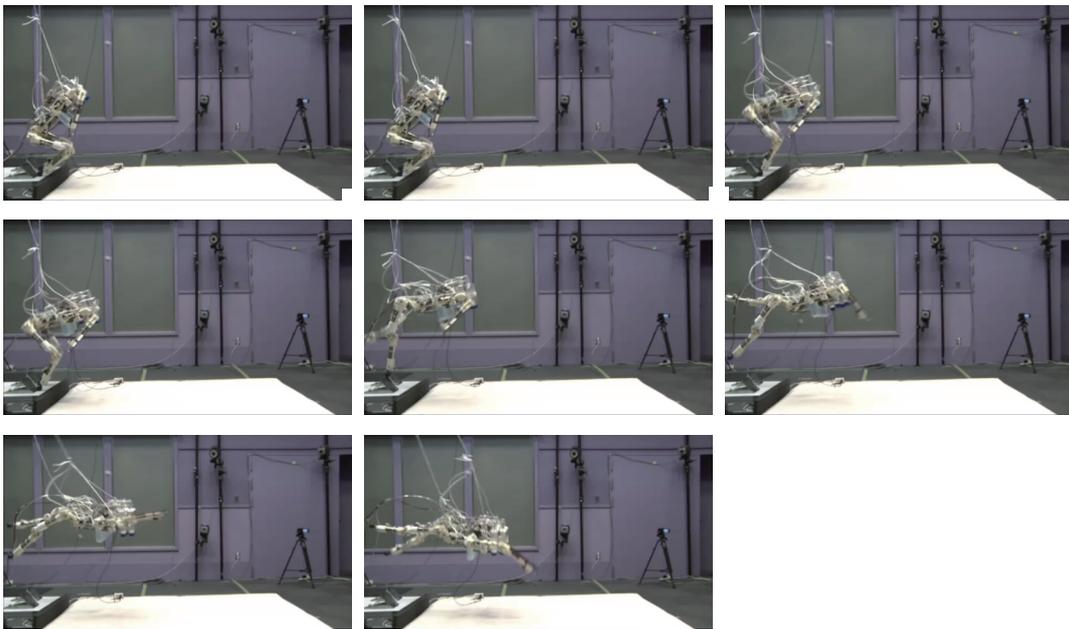


Fig.6.17 Snapshots of jump hit motion in training.

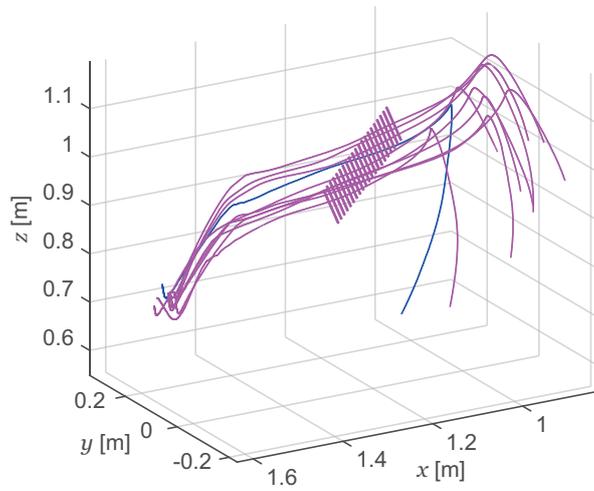


Fig.6.18 Prediction of hand position in training.

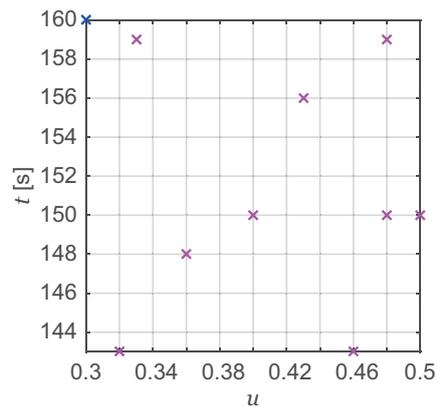


Fig.6.19 Command and switching time in training.

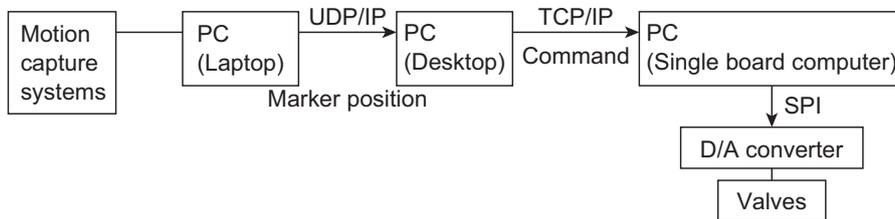


Fig.6.20 Information processing flow with motion capture systems.

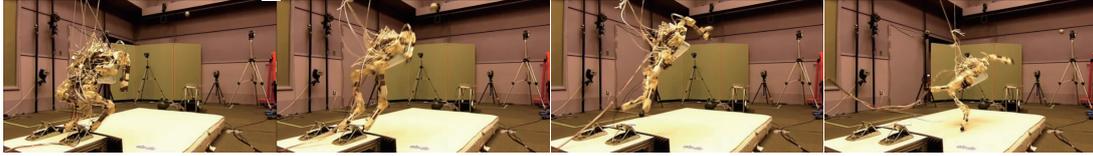


Fig.6.21 Snapshots of jump hit motion in tests (center).

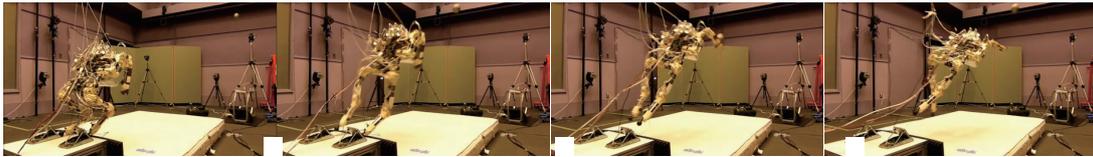


Fig.6.22 Snapshots of jump hit motion in tests (right).

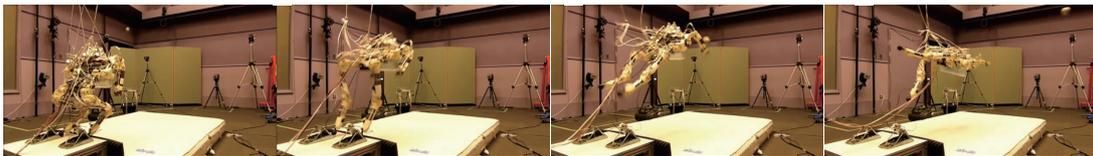


Fig.6.23 Snapshots of jump hit motion in tests (left).

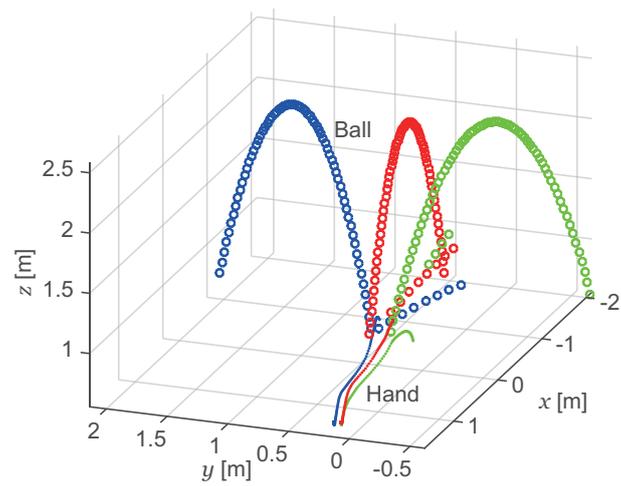


Fig.6.24 Ball and hand trajectories in tests.

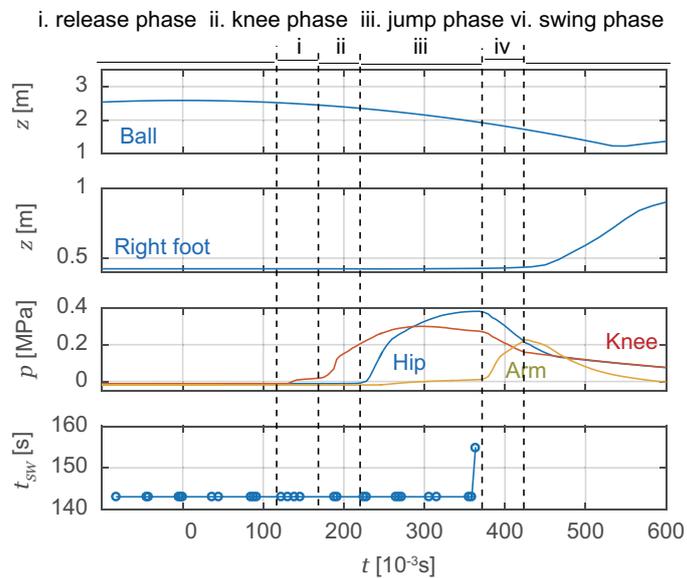


Fig.6.25 Time chart of jump hit motion.

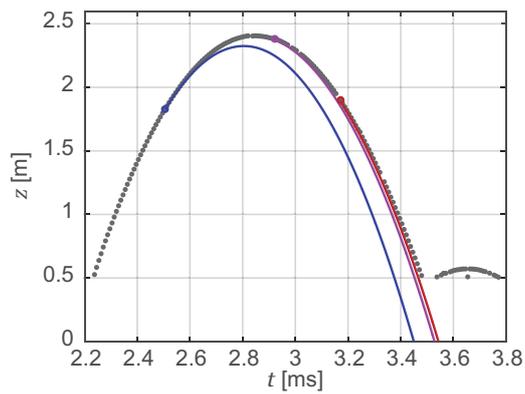


Fig.6.26 Ball trajectory prediction.

第7章

結論

まず、本研究の概要について再確認する。本研究では、不確定な突発事象に即応した全身ダイナミック動作を行うことで危機回避等を達成可能なヒューマノイドロボットの実現に向けて、その代表例として、事前に確定していない軌道とタイミングで飛来するボールに即応し、跳躍し空中で打撃する腕付二脚ロボットの構成法を扱った。主な課題は、(1) 極めて短時間での適切な跳躍・打撃動作計画、(2) 計画軌道に沿った全身跳躍の実現、(3) 確実なボール打撃のための運動中の誤差補償、である。これについて本研究では、(i) 軽量大ストローク空気圧駆動系とそれを用いた腕付二脚ロボットの設計法、(ii) 同駆動系の特性を考慮した全身動作学習、生成法および運動中の誤差補償のための高速な過渡的動作の調節法、を中心とする解決策を提示し、提案手法の有用性を実験的に示した。

本論文では、ヒューマノイドロボットによる即応的でダイナミックな全身動作の実現に向けて、その代表例として腕付脚式ロボットによる跳躍打撃動作を扱った。これを達成するために、運動軌道計画とその厳密な追従という従来の戦略ではなく、目標へ到達する指令と時間、および運動調節のための時間調節量を学習する戦略を選択した。この戦略に適したロボットとして空気圧ロボットに着目し、跳躍打撃動作を行う空気圧ロボットを構成する身体設計法、動作学習・生成法、運動調節法を提案し、実機による跳躍打撃動作の実現を通じて提案する構成法の有用性を示した。以上のように、本論文は腕付脚式ロボットの即応的な跳躍打撃動作に焦点を絞って実現方法を具体的に示し、即応的でダイナミックな全身動作を行うヒューマノイドロボットの実現への端緒を拓いた。

7.1 得られた知見

3章では、即応的でダイナミックな動作を行う自律型空気圧ロボットの駆動系設計に取り組んだ。これには、ストロークの大きい軽量小型アクチュエータ、および速度と加速度を最大化する設計パラメタの選択が必要であった。このためまず、ダイナミック動作を行うロボットのための駆動系として、ナイロン製自作造形部品による重量部品の代替と構造一体化によって軽量化、および頑健でコンパクトなワイヤ固定法やワイヤ経路設計法などによって実現される構造一体型ケーブルシリンダを提案した。軽量化の効果を定量的に検証するため、提案する設計と典型的なシリンダの重量を比較し、内径40mmのシリンダの場合に1個あたり0.67 kg、56%の重量削減が可能であることを示した。次に、速度と加速度を最大化する設計パラメタの選択法として、空気圧力の動的変化を考慮した設計法を提案した。簡易なモデルの跳躍を模擬した動作シミュレーションを行って空気圧力の動的変化を考慮した設計法と考慮しない設計法を比較し、最大で運動終端における体幹の速度が1.1倍になる結果を示し、提案する設計法によってより大きな速度を得る設計パラメタを選択できることを示した。最後に、ロボット腕が2.9 kg、脚が4.7 kgと軽量に製作できることを確認した。さらに、それらの運動を計測し、腕振り上げ動作の手先速度5.8 m/s、脚跳躍動作の離陸時体幹速度垂直成分2.1 m/sという結果を得た。これらを跳躍打撃動作シミュレーションで得られた速度と比較して、提案する設計法を用いて開発したロボット四肢が跳躍打撃動作に必要な性能を備えていることを確認した。

4章では、空気圧駆動系の特性を考慮した動作学習、生成法および運動中の誤差補償のための調節法に取り組んだ。そこではまず、この学習、生成法を、所望の状態からそこへ到達する時間と運動指令を計算する問題として設定し、解決策として軌道類似性に基づく分類と回帰、補間を用いた動作学習・生成手法を提案した。振り子の振り上げ動作シミュレーションにおいて提案手法を用いた場合に、到達位置の誤差平均が最近傍法の82%であるという結果を得た。加えて、空気圧ロボットアームの振り上げ実験、脚ロボットの跳躍シミュレーションも行い、一連の実験で提案手法により所望の状態からそこへ到達する時間と運動指令を計算できることを示した。さらに、空気圧ロボットの運動調節法として、運動指令切り替えタイミングの修正による運動調節法を提案した。単純モデルを用いて跳躍時刻の状態誤差を補償するシミュレー

ションを行い，提案する運動調節法を行った場合のボール落下位置の誤差平均が調節しない場合の42%に減少するなどの結果を示し，提案する調節法の有用性を示した．以上に加えて，同一の身体を備えたロボットが異なる初期姿勢から行う跳躍打撃動作のシミュレーションを行い，初期姿勢の選択によって打撃点の距離が最大で19%増加することを示し，跳躍打撃動作性能における初期姿勢の重要性を示した．さらに，動作時間を最小化する初期姿勢の生成法，初期内圧の調節法，待機動作の生成法を提案した．

5章では，4章で提案した動作学習・生成手法と運動調節法を，多自由度の腕付脚式ロボット実機による跳躍打撃動作に適用するために改良した．高次元化と少数訓練サンプルに起因する過学習の問題を回避するため，まず運動指令から状態への順モデルとしての写像を実訓練データから学習し，これを用いて多数の指令・状態ペアを生成することで訓練データを擬似的に増やす処理を加えた．跳躍打撃動作のシミュレーションにおいて拡張前と拡張後の手法をそれぞれ用いた手先位置誤差を比較し，拡張後手法の誤差平均値が拡張前の31%に減少することを示し，拡張した手法の有用性を示した．次に，より少ない試行での学習と運動調節を可能にするために，運動指令の選択，状態遷移時間の推定，運動指令切り替えタイミングの修正量の3つを同時に学習する手法を検討した．10回の訓練を行う跳躍打撃動作の学習シミュレーションにおいて調節の有無による手先誤差を比較し，調節を行うことで手先位置誤差の平均値が42%減少することを示し，提案する調節法の有用性を示した．

第6章では，実機による跳躍打撃動作実験について述べた．この実験を通じて提案する各手法の有用性を実験的に示した．実験では，提案した設計法を用いて設計，製作し，ボールの認識，予測機能を実装した腕付脚式ロボットシステムを用いた．まず，開発した腕付脚式ロボットに手先到達位置の異なる多様な跳躍打撃動作を行わせ，提案する設計法で跳躍打撃動作を行うロボット身体を実現できることを実証した．さらに，このロボットに提案した学習法を用いて跳躍打撃動作における運動指令，運動指令切替時刻，手先状態，経過時間の関係性を学習させた．ロボットは未知の軌道で飛来するボールに対して実時間で位置推定，軌道推定，運動予測を行い，打撃位置，動作開始タイミングを決定し，動作開始後に提案した手法で予測誤差を補償しながら跳躍し，打撃を実現した．

7.2 意義

第3章で得られた知見の意義について述べる。第3章では、即応的でダイナミックな全身運動を行うロボットのための軽量小型大ストロークの空気圧駆動系として、構造一体型空気圧ケーブルシリンダを提案した。従来の設計法で設計されたダイナミック動作を行う空気圧ロボット身体は単純であり、そのようなロボットが行う運動の種類は限定的であった。本研究の提案によって、環境非固定型で多数の回転関節を備え、多様なダイナミック運動を行う空気圧ロボットの設計が初めて可能になった。第3章ではこれに加えて、空気圧の動的変化を考慮した設計法を提案した。これまでに、内圧の動的変化を考慮して、有効断面積やシリンダ内径が単一のシリンダで跳躍するロボット跳躍性能に与える影響が調べられていた。本研究ではこの動的変化を考慮した設計を回転関節を備えたロボットの性能評価に初めて適用した。これにより、バルブの重量と流量とのトレードオフに加えて、所望の関節可動域や関節の大きさを考慮して、減速機導入の有無、減速比、シリンダ内径、バルブの個数などをダイナミック動作性能を最大化するように決定することが初めて可能になった。

第4章および第5章で得られた知見の意義について述べる。第4章では、空気圧駆動系の特性を考慮した動作学習、生成法と調節法を提案し、第5章では、それらの手法を拡張し、腕付脚式ロボットの跳躍打撃動作に適用した。得られた知見の意義として、提案手法の主な特徴を5つ挙げる。第1の特徴として、ロボットが目標状態へ至るように制御する従来手法と比較して、目標状態へ至るまでの時間が計算可能な点が挙げられる。このため、特定のタイミングで所望の状態に至ることが可能である。第2の特徴として、現在状態が目標状態へ至るまでの軌道を計画し、その軌道を追従する従来手法と比較して、目標状態に到達する運動がきわめて短い時間で計算可能な点が挙げられる。第3の特徴として、跳躍のような加速動作は制御性が低く、従来の典型的な制御手法では達成困難な動作であったことと比較して、加速動作への適用が容易である点が挙げられる。第4の特徴として、跳躍などのダイナミック動作性能を最大化する従来の学習手法や固定的な環境における動作を学習する手法と比較して、動的な環境における、状況に応じたダイナミック動作へ適用可能な点が挙げられる。第5の特徴として、従来の制御による軌道追従性を前提として軌道を学習する、打撃の学習など状況適応的なダイナミック動作生成手法と比較して、目標状態から運動指令

を直接計算でき、低制御性のロボットにも適用可能な点が挙げられる。

本研究では提案手法を時間区分一定の運動指令で駆動する腕付脚式の空気圧ロボットの跳躍打撃動作に適用した。提案手法は、原理的には運動指令切り替え時刻を含む離散化された運動指令で駆動するロボット運動一般に拡張可能である。このため環境固定ロボットのリーチングや脚式ロボットの歩行などにも応用可能である。さらに、本研究では跳躍局面から空中局面への切り替え時刻を修正することで運動を調節した。提案する調節法は、運動指令切り替え時刻を含む運動指令で駆動する運動であれば適用できるため、打撃におけるボールと腕の衝突直前まで、運動を調節することが原理的に可能である。加えて、腕付脚式ロボットの跳躍打撃動作ではボールの運動予測の誤差を提案手法によって調節した。単純モデルを用いた運動調節実験において行ったように、提案手法を用いてロボットの運動実行誤差を補償することも可能であり、十分なサンプル数が確保できれば、知覚、予測、環境や自身のモデル、運動などに発生する誤差を同時に修正することも原理的に可能である。

第6章では、提案した設計法を用いて設計、製作した腕付脚式の空気圧ロボットに、提案した学習法を用いて跳躍打撃動作における運動指令、運動指令切替時刻、手先状態、経過時間の関係性を学習させ、提案した手法で予測誤差を補償しながら運動を調節し、事前に与えられていない軌道で飛来するボールを跳躍して打撃させた。これを通じて提案する即応的な跳躍打撃動作を行う空気圧ロボットの構成法の有用性を実証した。従来のヒューマノイドロボットによる踏み出しリーチングなどの、移動を含み、上肢で目標を達成する運動と比較して、本研究で実現した腕付脚式ロボットによる跳躍打撃動作は、動作計画の時間および実行時間がきわめて短く、速度、加速度が大きい運動であり、腕付脚式ロボットが即応的でダイナミックな全身動作を実現した世界初の例である。

7.3 展望

本研究で得られた知見は、設計可能性の広がりを与える。第3章で用いた、動力学モデルを仮定し、シミュレーションを反復して最適な設計パラメタを決定する手法は、多数の駆動装置を備えた空気圧駆動系全体に拡張可能である。これによって、アクチュエータの設計パラメタの最適化に加えて、タンク、バルブの種類と個数、配管なども最適化できる。さらに、バネなどのダイナミクスを備えた他のアクチュエータ

を備えた身体においても、同様に反復的シミュレーションによって全身の最適な設計解を導くこと可能である。このようなシミュレーションを用いた反復計算による設計解の導出は進化的手法による自動設計と類似している。自動設計は多様な形態のロボットへと拡張が進んでおり、本研究で用いたダイナミック運動性能の指標はこれらの自動設計と統合可能である。さらに、設計を決定する評価関数を移動距離などの従来の静的で固定的な関数から、運動の多様性、環境の多様性、環境変動に対する行為遂行可能性を評価する動的なものへと拡張することで、適応性を備えた身体 of 自動設計へと進展できる。これは、本研究で提案する設計論が、単一の動作を行う単純な身体を最適化するのではなく、多様な運動を行う複雑な身体を最適化することを前提にしているためである。

本研究で提案した動作学習・生成方法と運動調節法はより多様な身体 of ロボットに運動適応性を与える。提案手法では、目標状態へ至る指令とともに、その状態へ至るまでの時間が計算できる。これによって、所望のタイミングでロボットを所望の状態へと遷移させることが可能になった。このため提案手法は、道具を用いた打動作や、エスカレータなどへのタイミングを含む飛び移り、ダンスや手遊びなどタイミングを含む人間とのインタラクションにも応用可能である。さらに、この提案手法では状態遷移と遷移時間の写像が獲得できるため、提案手法と4章後半で論じた身構え動作の生成手法との統合によって、不確定な目標状態に対して即応性を事前に最適化する身構え行動を生成することが初めて可能になる。加えて、自身の時間的な状態変化の表現を有することで、状況の予測は自身の行為遂行可能性と結びついたものになる。これは、自身と環境の動的変化を内包した自身の行為遂行可能性に基づいて予測を反映した行動を行うロボットの端緒となる。すなわち、人間や他の動物が、常に予測しつつ、その予測を反映して行動するように、常に状況変化を予測しながら運動するロボット、および自身の次の運動を予測することで効率的な知覚を可能にするロボット実現への端緒となる。さらに、自身と環境の動的変化を内包した自身の行為遂行可能性モデルをロボットの予測的な行動生成だけではなく、人間の運動を解釈する計算論的モデルとして用いることで、人間の動的な運動・情報処理過程の原理を知る重要な道具になると考えられる。

提案手法は目標状態に到達する運動がきわめて短い時間で計算でき、加速動作への適用が容易である。このため、軌道の計画と追従を行う制御戦略 of ロボットにも適用し、通常の精緻な制御を行うモードに加えて、緊急危機回避などのためのダイナミッ

ク運動のモードを与えられる。具体的には、各状況においてロボットが最適化問題を解いて軌道を計画、運動を実行し、その運動を記憶しておけば、新規な状況において新しい運動が必要な場合、過去の運動経験から指令が計算でき、過去の跳躍などの加速度運動を行っていれば、そのような運動も瞬時に計算できる。同時に、目標状態に到達する時間も瞬時に計算されるため、時間的制約の強い場面において、タイミングを含めて制約を満たす運動を高速に計算することが可能になる。この計算速度の向上度合いは、ヒューマノイドのような多自由度身体を備えたロボットにおいて顕著になると考えられる。

提案した学習手法は、目標状態から運動指令を直接計算でき、動的な環境における状況に応じたダイナミック動作へ適用可能であり、低制御性のロボットにも適用可能である。このため、行動計画、運動計画、軌道追従・制御の順に行われるトップダウンな運動生成を行うロボットだけでなく、身体、環境、神経系の相互作用によってボトムアップに運動を創発するロボットにも応用できる。これによって初めて、創発的な運動知能が大きな環境の変化や動的な環境変化に応じて振る舞いを変化させることが初めて可能になる。さらに、身体モデル化が困難な、きわめて多数の自由度を備える柔軟な身体の粘弾性要素を多数かつ複雑に備えた俊敏なロボットに応用すれば、状況適応的なダイナミック運動を行わせることができる。

付録 A

業績一覧

学術論文誌

1. Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Kazuya Shida, Toshihiko Fukushima, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “A Musculoskeletal Bipedal Robot Designed with Angle-Dependent Moment Arm for Dynamic Motion from Multiple States,” *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 7, pp. 487–496, 2014.

国際会議における発表 (査読あり口頭発表)

3. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Adjustment of Pressure in Antagonistic Joints with Pneumatic Artificial Muscles for Rapid Reacting Motions,” In *Proceedings of 17th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2014)*, pp. 183–190, Poznan, Poland, Jul. 2014.
4. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Effect of Preliminary Motions on Agile Motions,” In *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2013)*, Montevideo, Uruguay, Nov. 2013.
5. Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa and Yasuo Kuniyoshi, “Improvement of Energy Consumption by Movement of Center of Rotation of Joint,” In *Proceedings of 16th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2013)*, pp. 272–280, Sydney, Australia, Jul. 2013.

国際会議における発表 (査読ありポスター発表)

11. Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Kazuya Shida, Ryuma Niiyama and Yasuo Kuniyoshi, “Angle-Dependent Moment Arm with Biased Pivot for Jumping from Various Squatting Positions,” In *Proceedings of 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2013)*, P-24, Darmstadt, Germany, Mar., 2013.
12. Toshihiko Fukushima, Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka and Yasuo Kuniyoshi, “Transitional Buckling Model for Active Bending Effect in Pole Vault,” In *Proceedings of 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM 2013)*, P-8, Darmstadt, Germany, Mar., 2013.
13. Kazutoshi Tanaka, Kunihiro Ogata and Yasuo Kuniyoshi, “Role of Vertical Component in Skillful Pushing Motion,” Full-day workshop on Computational Techniques in Natural Motion Analysis and Reconstruction at IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, May, 2013.

国内学会における発表 (査読なし口頭発表)

16. 西川鋭, 田中一敏, 國吉康夫, “立位での巧緻動作における支持腕の肩外転角度が手先の停止安定性に与える影響,” 第 23 回 日本バイオメカニクス学会大会 (JSB 2014), O2-A4, 東京, Sep. 2014.
17. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “準備局面の拮抗的筋活動が踏み出しリーチングに与える効果,” 第 32 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2014), 3B1-02, 福岡, Sep. 2014.
18. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “敏捷動作に先立つ構えの効果検討,” 第 31 回 日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2013), 3K3-02, 東京, Sep. 2013.

国内学会における発表 (査読なしポスター発表)

24. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “確率的目標状態への遷移時間を最小化する準備動作,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech 2014), 富山, Jun. 2014.
25. 田中一敏, 西川鋭, 國吉康夫, “敏捷動作生成に先立つ構え生成手法の検証,” 第19回創発システムシンポジウム, P-9, 大阪, Aug. 2013.
26. 新井悠介, 若田部亮, 田中一敏, 大村吉幸, 國吉康夫, “ロボットの即応的柔軟物使用のための単純モデルによる動作生成,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomech 2015), 京都, Mar. 2015.

謝辞

本研究は、東京大学大学院情報理工学系研究科國吉康夫教授の御指導のもとで行われました。國吉教授には修士1年の時から博士4年までの6年間本当にお世話になりました。真に重大な問題を見極めてそれを達成し、価値が伝わるように見る・聞く人の感情に訴えかける発表を行う研究哲学や研究に対する心構えに始まり、研究テーマの設定、研究計画、計画遂行時の問題分解、論文、プレゼンテーションの方法など、多くのことを教えて頂き、この博士論文を完成に近づけるために5時間に及ぶ個人面談を初めとする多数の個人面談やメールのやり取りを頂きました。ありがとうございました。

中村仁彦教授、稲葉雅幸教授、岡田慧准教授、新山龍馬講師には、博士論文審査委員として、丁寧かつ鋭いご指摘を多数頂き、論文を大幅に改善することができました。具体的には、研究の独創性を明確かつ正しく伝達するための心構えや博士研究が到達すべき地平、多数関節身体運動の高次元空間における軌道最適化、制約充足、非線形制御に対する本研究の位置付けの説明方法、統合システムであるヒューマノイドロボットを考慮した本研究で提案するロボット構成法の位置付けの説明方法、従来の典型的な身体と駆動方法を備えたロボットに対する本研究の優位性の説明方法、開発した腕付脚式ロボットの評価方法を改善する方法、圧縮性流体を備えた提案する駆動系の評価方法を改善する方法、提案する構成法の実機運用に対する応用方法、提案する学習手法が与える展開や応用方法、提案する学習手法や運動調節法を今後において拡張するための課題や展望などについてご指摘を頂き、論文を改善することができました。深く感謝いたします。ありがとうございました。

研究室の職員の皆様にも、大変お世話になりました。新山龍馬講師には、ロボット設計や論文修正に関する多くのアドバイスを頂きました。加えて、ロボット製作のための物品購入や論文投稿に関して、多くの後押しを頂きました。ありがとうございました。

した。大村吉幸特任研究員には、研究会などで貴重なご指摘を頂きました。ありがとうございました。西川鋭助教には、博士課程の全研究の共同研究者として、多くのご助力を賜りました。研究テーマ決定に関する議論、プログラム実装における課題解決、実機の設計と製作、運動計測実験の実験設計、計測データの解析、学会などの出張に関する手続き方法、論文や発表スライド、ポスターの推敲、研究資材の入手・管理、研究計画書の推敲など、あらゆる研究活動を助けて頂きました。ありがとうございました。金沢星慶研究員には、実験の補助を行って頂き、実験方法やロボット構成を改善するためのアドバイスを頂きました。さらに、研究計画書執筆に関して、有益なアドバイスを多く頂きました。ありがとうございました。秘書の都丸美緒子さん、技官の永井おりがさんには研究費や旅費、その他諸々の手続きでお世話になりました。ありがとうございました。

博士研究を進める上で、研究室の先輩、同期、後輩に多くの助けをもらいました。先輩の山田康智さんには、博士研究に対する考え方や博士研究の進め方などを教えて頂きました。さらに、統計の方法、図の作成方法や論文の構成方法を教えて頂き、研究計画書の書き方などについてご指導を頂きました。ありがとうございました。同期の Shih-Yin Chang さんには、実験の補助などで助けて頂きました。ありがとうございました。後輩の藤井敬子さんには、研究計画に対する助言などを頂きました。ありがとうございました。後輩の若田部亮さんには、学習手法の改善のための助言を頂きました。ありがとうございました。後輩の Chen Xi さんには、電装系部品や機構系部品の設計・製造などを助けて頂きました。ありがとうございました。後輩の森翔太郎さん、長晴紀さん、張仁彦さんには、ロボットの機構系部品の製作を助けて頂きました。ありがとうございました。後輩の行澤大悟さん、漆戸航平さんには実験準備・撤収を助けて頂きました。ありがとうございました。その他、先輩方や社会人になった同期の方々、研究室のメンバー、研究室在籍中に研究室の一員だった皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Y. Abe, B. Stephens, M. P. Murphy, and A. A. Rizzi. Dynamic whole-body robotic manipulation. In *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [2] A. Ajoudani, J. Lee, A. Rocchi, M. Ferrati, E. M. Hoffman, A. Settimi, D. G. Caldwell, A. Bicchi, and N. G. Tsagarakis. A manipulation framework for compliant humanoid coman: Application to a valve turning task. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 664–670. IEEE, 2014.
- [3] A. M. Al-Ibrahim. *Transient air temperature and pressure measurements during the charging and discharging processes of an actuating pneumatic cylinder*. University of Wisconsin–Madison, 1991.
- [4] R. L. Anderson. *A robot ping-pong player: experiment in real-time intelligent control*. MIT press, 1988.
- [5] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis. A survey on applications of pneumatic artificial muscles. In *Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pp. 1439–1446. IEEE, 2011.
- [6] H. Arisumi, J. R. Chardonnet, and K. Yokoi. Whole-body motion of a humanoid robot for passing through a door-opening a door by impulsive force. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 428–434. IEEE, 2009.
- [7] Y. Asano, T. Kozuki, S. Ookubo, M. Kawamura, S. Nakashima, T. Katayama, I. Yanokura, T. Hirose, K. Kawaharazuka, S. Makino, et al. Human mimetic musculoskeletal humanoid kengoro toward real world physically interactive actions. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 876–883. IEEE, 2016.
- [8] B. Bäuml, F. Schmidt, T. Wimböck, O. Birbach, A. Dietrich, M. Fuchs, W. Friedl,

- U. Frese, C. Borst, M. Grebenstein, et al. Catching flying balls and preparing coffee: Humanoid rollin'justin performs dynamic and sensitive tasks. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3443–3444. IEEE, 2011.
- [9] C. Becker-Asano and H. Ishiguro. Evaluating facial displays of emotion for the android robot geminoid f. In *Workshop on Affective Computational Intelligence*, pp. 1–8. IEEE, 2011.
- [10] O. Birbach, U. Frese, and B. Bäuml. Realtime perception for catching a flying ball with a mobile humanoid. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5955–5962. IEEE, 2011.
- [11] C. Blanes, M. Mellado, and P. Beltran. Novel additive manufacturing pneumatic actuators and mechanisms for food handling grippers. In *Actuators*, Vol. 3, pp. 205–225. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2014.
- [12] J. E. Bobrow, S. Dubowsky, and J. Gibson. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. *The international journal of robotics research*, 4(3):3–17, 1985.
- [13] J. E. Bobrow and B. W. McDonell. Modeling, identification, and control of a pneumatically actuated, force controllable robot. *Robotics and Automation*, 14(5):732–742, 1998.
- [14] D. Büchler, H. Ott, and J. Peters. A lightweight robotic arm with pneumatic muscles for robot learning. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4086–4092. IEEE, 2016.
- [15] S. Y. Chang, K. Takashima, S. Nishikawa, R. Niiyama, T. Someya, H. Onodera, and Y. Kuniyoshi. Design of small-size pouch motors for rat gait rehabilitation device. In *International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4578–4581. IEEE, 2015.
- [16] G. Cheng, S.-H. Hyon, J. Morimoto, A. Ude, J. G. Hale, G. Colvin, W. Scroggin, and S. C. Jacobsen. Cb: A humanoid research platform for exploring neuroscience. *Advanced Robotics*, 21(10):1097–1114, 2007.
- [17] C.-P. Chou and B. Hannaford. Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. *Robotics and Automation*, 12(1):90–102, 1996.
- [18] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse. Efficient bipedal robots based on

- passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712):1082–1085, 2005.
- [19] F. Daerden and D. Lefeber. The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles. *International Journal of Fluid Power*, 2(3):41–50, 2001.
- [20] A. De Luca and F. Flacco. Integrated control for phri: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. In *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 288–295. IEEE, 2012.
- [21] Z. J. Domire and J. H. Challis. The influence of squat depth on maximal vertical jump performance. *Journal of sports sciences*, 25(2):193–200, 2007.
- [22] J. Donahue, Y. Jia, O. Vinyals, J. Hoffman, N. Zhang, E. Tzeng, and T. Darrell. Decaf: A deep convolutional activation feature for generic visual recognition. In *Icml*, Vol. 32, pp. 647–655, 2014.
- [23] A. D. Dragan, K. C. Lee, and S. S. Srinivasa. Legibility and predictability of robot motion. In *International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 301–308. IEEE, 2013.
- [24] G. M. Duthie, D. B. Pyne, A. A. Ross, S. G. Livingstone, and S. L. Hooper. The reliability of ten-meter sprint time using different starting techniques. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(2):251, 2006.
- [25] A. Escande, N. Mansard, and P.-B. Wieber. Hierarchical quadratic programming: Fast online humanoid-robot motion generation. *The International Journal of Robotics Research*, 33(7):1006–1028, 2014.
- [26] P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7):760–772, 1998.
- [27] C. Fitzgerald. Developing baxter. In *International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*, pp. 1–6. IEEE, 2013.
- [28] P. Foot. The problem of abortion and the doctrine of double effect. 1967.
- [29] D. M. Frost, J. B. Cronin, and G. Levin. Stepping backward can improve sprint performance over short distances. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(3):918–922, 2008.
- [30] K. Fujii, S. Yoshioka, T. Isaka, and M. Kouzaki. Unweighted state as a sidestep preparation improve the initiation and reaching performance for basketball players. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(6):1467–1473, 2013.

- [31] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa. Ukemi: Falling motion control to minimize damage to biped humanoid robot. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2521–2526. IEEE, 2002.
- [32] N. Furukawa, A. Namiki, S. Taku, and M. Ishikawa. Dynamic regrasping using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 181–187. IEEE, 2006.
- [33] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 580–587, 2014.
- [34] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, A. De Luca, and G. Hirzinger. Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3356–3363. IEEE, 2008.
- [35] K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, and H. Hirukawa. A humanoid robot carrying a heavy object. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1712–1717. IEEE, 2005.
- [36] D. Hobbelen, T. de Boer, and M. Wisse. System overview of bipedal robots flame and tulip: Tailor-made for limit cycle walking. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2486–2491. IEEE, 2008.
- [37] K. Hosoda, Y. Sakaguchi, H. Takayama, and T. Takuma. Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure. *Autonomous Robots*, 28(3):307–316, 2010.
- [38] M. B. Howarth. Dynamic posture. *The Journal of health and physical education*, 18(10):704–706, 1947.
- [39] C. Hubicki, M. Jones, M. Daley, and J. Hurst. Do limit cycles matter in the long run? stable orbits and sliding-mass dynamics emerge in task-optimal locomotion. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5113–5120. IEEE, 2015.
- [40] M. Hutter, C. D. Remy, M. A. Hoepflinger, and R. Siegwart. Scarleth: Design and control of a planar running robot. In *International Conference on Intelligent*

-
- Robots and Systems*, pp. 562–567. IEEE, 2011.
- [41] S.-H. Hyon and T. Mita. Development of a biologically inspired hopping robot-“kenken”. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3984–3991, 2002.
- [42] S. Ikemoto, H. B. Amor, T. Minato, B. Jung, and H. Ishiguro. Physical human-robot interaction: Mutual learning and adaptation. *Robotics & automation magazine*, 19(4):24–35, 2012.
- [43] S. Ikemoto, Y. Nishigori, and K. Hosoda. Advantages of flexible musculoskeletal robot structure in sensory acquisition. *Artificial Life and Robotics*, 17(1):63–69, 2012.
- [44] K. Ikuta, M. Tsukamoto, and S. Hirose. Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 427–430. IEEE, 1988.
- [45] H. Ishihara and M. Asada. Design of 22-dof pneumatically actuated upper body for child android ‘affetto’. *Advanced Robotics*, 29(18):1151–1163, 2015.
- [46] I. Ishii, Y. Nakabo, and M. Ishikawa. Target tracking algorithm for 1 ms visual feedback system using massively parallel processing. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2309–2314. IEEE, 1996.
- [47] Y. Ito, S. Nozawa, J. Urata, T. Nakaoka, K. Kobayashi, Y. Nakanishi, K. Okada, and M. Inaba. Development and verification of life-size humanoid with high-output actuation system. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3433–3438. IEEE, 2014.
- [48] L. Itti and C. Koch. Computational modelling of visual attention. *Nature reviews neuroscience*, 2(3):194–203, 2001.
- [49] T. M. Johnson, L. E. Brown, J. W. Coburn, D. A. Judelson, A. V. Khamoui, T. T. Tran, and B. P. Uribe. Effect of four different starting stances on sprint time in collegiate volleyball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(10):2641–2646, 2010.
- [50] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2,

- pp. 1620–1626. IEEE, 2003.
- [51] H. Kaminaga, T. Yamamoto, J. Ono, and Y. Nakamura. Backdrivable miniature hydrostatic transmission for actuation of anthropomorphic robot hands. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 36–41. IEEE, 2007.
- [52] B.-S. Kang, C. S. Kothera, B. K. Woods, and N. M. Wereley. Dynamic modeling of mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 182–187. IEEE, 2009.
- [53] Y. Kawazoe. Nanba walking robot (jizai movement of physical body using state transition with instability). *Journal ref: Journal of Robotics and Mechatronics*, 26(6):673–684, 2014.
- [54] E. Kelasidi, G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis. A survey on pneumatic muscle actuators modeling. In *International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1263–1269. IEEE, 2011.
- [55] F. Kikuchi, Y. Ota, and S. Hirose. Basic performance experiments for jumping quadruped. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 4, pp. 3378–3383. IEEE, 2003.
- [56] S. Kim and A. Billard. Estimating the non-linear dynamics of free-flying objects. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(9):1108–1122, 2012.
- [57] S. Kim, A. Shukla, and A. Billard. Catching objects in flight. *Transactions on Robotics*, 30(5):1049–1065, 2014.
- [58] H. Kimura, S. Akiyama, and K. Sakurama. Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator. *Autonomous robots*, 7(3):247–258, 1999.
- [59] K. Kong, J. Bae, and M. Tomizuka. Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human–robot interaction applications. *Transactions on mechatronics*, 14(1):105–118, 2009.
- [60] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.-C. Zufferey, and D. Floreano. A miniature 7g jumping robot. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 373–378. IEEE, 2008.
- [61] J. J. Kuffner Jr, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Footstep planning among obstacles for biped robots. In *International Conference on Intelligent*

-
- Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 500–505. IEEE, 2001.
- [62] S. Kuindersma, R. Deits, M. Fallon, A. Valenzuela, H. Dai, F. Permenter, T. Koolen, P. Marion, and R. Tedrake. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot. *Autonomous Robots*, 40(3):429–455, 2016.
- [63] Y. Kuniyoshi, Y. Ohmura, K. Terada, and A. Nagakubo. Dynamic roll-and-rise motion by an adult-size humanoid robot. *International Journal of Humanoid Robots*, 1(03):497–516, 2004.
- [64] Y. Kuniyoshi, Y. Ohmura, K. Terada, A. Nagakubo, Shin' ichiro, T. Yamamoto. Embodied basis of invariant features in execution and perception of whole-body dynamic actions—knacks and focuses of roll-and-rise motion. *Robotics and Autonomous Systems*, 48(4):189–201, 2004.
- [65] J. Kwon, T. Yoshikawa, and O. Khatib. Elastic strips: Implementation on a physical humanoid robot. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3369–3376. IEEE, 2012.
- [66] J. A. LeDune, T. W. Nesser, A. Finch, and R. A. Zakrajsek. Biomechanical analysis of two standing sprint start techniques. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(12):3449–3453, 2012.
- [67] A. D. Marchese, K. Komorowski, C. D. Onal, and D. Rus. Design and control of a soft and continuously deformable 2d robotic manipulation system. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2189–2196. IEEE, 2014.
- [68] M. T. Mason and K. M. Lynch. Dynamic manipulation. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 152–159. IEEE, 1993.
- [69] M. Matsushima, T. Hashimoto, M. Takeuchi, and F. Miyazaki. A learning approach to robotic table tennis. *Transactions on robotics*, 21(4):767–771, 2005.
- [70] C. Maufroy, H. Maus, K. Radkhah, D. Scholz, O. von Stryk, and A. Seyfarth. Dynamic leg function of the BioBiped humanoid robot. In *International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, pp. 33–34, 2011.
- [71] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada. Cb2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 557–562. IEEE, 2007.

- [72] I. Mizuuchi, M. Kawamura, T. Asaoka, and S. Kumakura. Design and development of a compressor-embedded pneumatic-driven musculoskeletal humanoid. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 811–816. IEEE, 2012.
- [73] K. Mülling, J. Kober, O. Kroemer, and J. Peters. Learning to select and generalize striking movements in robot table tennis. *The International Journal of Robotics Research*, 32(3):263–279, 2013.
- [74] K. Mülling, J. Kober, and J. Peters. A biomimetic approach to robot table tennis. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1921–1926, 2010.
- [75] A. Murai, Q. Y. Hong, K. Yamane, and J. K. Hodgins. Dynamic skin deformation simulation using musculoskeletal model and soft tissue dynamics. *Computational Visual Media*, pp. 1–12, 2016.
- [76] A. Murai, K. Kurosaki, K. Yamane, and Y. Nakamura. Musculoskeletal-see-through mirror: Computational modeling and algorithm for whole-body muscle activity visualization in real time. *Progress in biophysics and molecular biology*, 103(2):310–317, 2010.
- [77] U. Nagarajan and A. Goswami. Generalized direction changing fall control of humanoid robots among multiple objects. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3316–3322. IEEE, 2010.
- [78] H. Nakai, Y. Taniguchi, M. Uenohara, T. Yoshimi, H. Ogawa, F. Ozaki, J. Oaki, H. Sato, Y. Asari, K. Maeda, et al. A volleyball playing robot. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1083–1089. IEEE, 1998.
- [79] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa, and M. Kaneko. Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2666–2671. IEEE, 2003.
- [80] K. Narioka and K. Hosoda. Designing synergistic walking of a whole-body humanoid driven by pneumatic artificial muscles: An empirical study. *Advanced Robotics*, 22(10):1107–1123, 2008.
- [81] A. A. Nassiraei, S. Masakado, T. Matsuo, T. Sonoda, I. Takahira, H. Fukushima, M. Murata, K. Ichikawa, K. Ishii, and T. Miki. Development of an artistic robot “jumping joe”. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*,

- pp. 1720–1725. IEEE, 2006.
- [82] G. Nelson, A. Saunders, N. Neville, B. Swilling, J. Bondaryk, D. Billings, C. Lee, R. Playter, and M. Raibert. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing. *日本ロボット学会誌*, 30(4):372–377, 2012.
- [83] R. Niiyama, K. Kakitani, and Y. Kuniyoshi. Learning to jump with a musculoskeletal robot using a sparse coding of activation. In *International Conference on Robotics and Automation Workshop on Approaches to Sensorimotor Learning on Humanoid Robots*, pp. 30–31, 2009.
- [84] R. Niiyama and Y. Kuniyoshi. Design principle based on maximum output force profile for a musculoskeletal robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(3):250–255, 2010.
- [85] R. Niiyama, A. Nagakubo, and Y. Kuniyoshi. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2546–2551, 2007.
- [86] R. Niiyama, S. Nishikawa, and Y. Kuniyoshi. A biomechanical approach for open-loop bipedal running with a musculoskeletal athlete robot. *Advanced Robotics*, 26(3–4):383–398, 2012.
- [87] R. Niiyama, D. Rus, and S. Kim. Pouch motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 6332–6337. IEEE, 2014.
- [88] S. Nishikawa, T. Fukushima, and Y. Kuniyoshi. Effective timing of swing-up motion by a pole-vaulting robot. In *International Conference on Advanced Robotics*, 2013.
- [89] S. Nishikawa, T. Kobayashi, T. Fukushima, and Y. Kuniyoshi. Pole vaulting robot with dual articulated arms that can change reaching position using active bending motion. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 395–400. IEEE, 2015.
- [90] S. Nishikawa, K. Shida, and Y. Kuniyoshi. Musculoskeletal quadruped robot with torque-angle relationship control system. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4044–4050. IEEE, 2016.
- [91] S. Nishikawa, K. Tanaka, K. Shida, T. Fukushima, R. Niiyama, and Y. Kuniyoshi.

- A musculoskeletal bipedal robot designed with angle-dependent moment arm for dynamic motion from multiple states. *Advanced Robotics*, 28(7):487–496, 2014.
- [92] K. Nishiwaki, J. Chestnutt, and S. Kagami. Autonomous navigation of a humanoid robot over unknown rough terrain. In *Robotics Research*, pp. 619–634. Springer, 2017.
- [93] K. Nishiwaki, M. Kuga, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Whole-body cooperative balanced motion generation for reaching. *International Journal of Humanoid Robots*, 2(04):437–457, 2005.
- [94] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba, and H. Inoue. Design and development of research platform for perception-action integration in humanoid robot: H6. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1559–1564. IEEE, 2000.
- [95] M. Noh, S. W. Kim, S. An, J. S. Koh, and K. J. Cho. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots. *Transactions on Robotics*, 28(5):1007–1018, 2012.
- [96] K. Ogawa, K. Narioka, and K. Hosoda. Development of whole-body humanoid “pneumat-bs” with pneumatic musculoskeletal system. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4838–4843. IEEE, 2011.
- [97] S. Oh and Y. Hori. Development of two-degree-of-freedom control for robot manipulator with biarticular muscle torque. In *2009 American Control Conference*, pp. 325–330. IEEE, 2009.
- [98] Y. Okadome, Y. Nakamura, K. Urai, Y. Nakata, and H. Ishiguro. Huma: A human-like musculoskeletal robot platform for physical interaction studies. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 676–683. IEEE, 2015.
- [99] D. Park, C. L. Zitnick, D. Ramanan, and P. Dollár. Exploring weak stabilization for motion feature extraction. In *Conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2882–2889, 2013.
- [100] H.-S. Park and C.-H. Jun. A simple and fast algorithm for k-medoids clustering. *Expert Systems with Applications*, 36(2):3336–3341, 2009.
- [101] I. W. Park, J. Y. Kim, J. Lee, and J. H. Oh. Mechanical design of humanoid robot platform khr-3 (kaist humanoid robot 3: Hubo). In *International Conference on*

-
- Humanoid Robots*, pp. 321–326. IEEE, 2005.
- [102] J. Park, K. S. Kim, and S. Kim. Design of a cat-inspired robotic leg for fast running. *Advanced Robotics*, 28(23):1587–1598, 2014.
- [103] S. Petti and T. Fraichard. Safe motion planning in dynamic environments. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2210–2215. IEEE, 2005.
- [104] R. Pfeifer, F. Iida, and G. Gomez. Morphological computation for adaptive behavior and cognition. *International Congress Series*, 1291:22–29, 2006.
- [105] R. Pfeifer, M. Lungarella, and F. Iida. The challenges ahead for bio-inspired ‘soft’ robotics. *Communications of the ACM*, 55(11):76–87, 2012.
- [106] Q.-C. Pham and Y. Nakamura. Time-optimal path parameterization for critically dynamic motions of humanoid robots. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 165–170. IEEE, 2012.
- [107] R. R. Playter and M. H. Raibert. Control of a biped somersault in 3d. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 582–589. IEEE, 1992.
- [108] G. A. Pratt and M. M. Williamson. Series elastic actuators. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 399–406. IEEE, 1995.
- [109] J. Pratt, B. Krupp, and C. Morse. Series elastic actuators for high fidelity force control. *Industrial Robot: An International Journal*, 29(3):234–241, 2002.
- [110] K. Radkhah, T. Lens, and O. von Stryk. Detailed dynamics modeling of biobiped’s monoarticular and biarticular tendon-driven actuation system. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4243–4250. IEEE, 2012.
- [111] M. H. Raibert. *Legged robots that balance*, Vol. 3. MIT press Cambridge, MA, 1986.
- [112] M. H. Raibert, H. B. Brown, and M. Chepponis. Experiments in balance with a 3d one-legged hopping machine. *The International Journal of Robotics Research*, 3(2):75–92, 1984.
- [113] E. Richer and Y. Hurmuzlu. A high performance pneumatic force actuator system: Part i-nonlinear mathematical model. *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*,

- 122(3):416–425, 2000.
- [114] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent asimo: System overview and integration. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2478–2483. IEEE, 2002.
- [115] V. Salvucci, Y. Kimura, S. Oh, and Y. Hori. Biwi: bi-articularly actuated and wire driven robot arm. In *International Conference on Mechatronics*, pp. 827–832. IEEE, 2011.
- [116] A. Sano, Y. Ikemata, and H. Fujimoto. Analysis of dynamics of passive walking from storage energy and supply rate. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 2478–2483. IEEE, 2003.
- [117] S. Satoh, K. Fujimoto, and S.-H. Hyon. Gait generation for passive running via iterative learning control. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5907–5912. IEEE, 2006.
- [118] A. Sayyad, B. Seth, and P. Seshu. Single-legged hopping robotics research—a review. *Robotica*, 25(05):587–613, 2007.
- [119] S. Schaal and C. G. Atkeson. Open loop stable control strategies for robot juggling. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 913–918. IEEE, 1993.
- [120] H. Schulte. The characteristics of the mckibben artificial muscle. *The application of external power in prosthetics and orthotics*, 874:94–115, 1961.
- [121] C. Semini. Hyq—design and development of a hydraulically actuated quadruped robot. *Doctor of Philosophy (Ph. D.), University of Genoa, Italy*, 2010.
- [122] T. Senoo, A. Namiki, and M. Ishikawa. High-speed batting using a multi-jointed manipulator. In *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1191–1196. IEEE, 2004.
- [123] T. Senoo, A. Namiki, and M. Ishikawa. High-speed throwing motion based on kinetic chain approach. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3206–3211. Citeseer, 2008.
- [124] L. Sentis and O. Khatib. A whole-body control framework for humanoids operating in human environments. In *International Conference on Robotics and*

- Automation*, pp. 2641–2648. IEEE, 2006.
- [125] S. Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim. Actuator design for high force proprioceptive control in fast legged locomotion. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1970–1975. IEEE, 2012.
- [126] M. A. Sharbafi, K. Radkhah, O. von Stryk, and A. Seyfarth. Hopping control for the musculoskeletal bipedal robot: Biobiped. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4868–4875. IEEE, 2014.
- [127] Z. Shiller and Y.-R. Gwo. Dynamic motion planning of autonomous vehicles. *Robotics and Automation*, 7(2):241–249, 1991.
- [128] D. Shin, I. Sardellitti, Y.-L. Park, O. Khatib, and M. Cutkosky. Design and control of a bio-inspired human-friendly robot. *The International Journal of Robotics Research*, 2009.
- [129] J. Slawinski, R. Dumas, L. Cheze, G. Ontanon, C. Miller, and A. Mazure-Bonnefoy. Effect of postural changes on 3d joint angular velocity during starting block phase. *Journal of sports sciences*, 31(3):256–263, 2013.
- [130] A. Smola and V. Vapnik. Support vector regression machines. *Advances in neural information processing systems*, 9:155–161, 1997.
- [131] O. Stasse, A. J. Davison, R. Sellaouti, and K. Yokoi. Real-time 3d slam for humanoid robot considering pattern generator information. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 348–355. IEEE, 2006.
- [132] H. Sugiura, M. Gienger, H. Janssen, and C. Goerick. Real-time collision avoidance with whole body motion control for humanoid robots. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2053–2058. IEEE, 2007.
- [133] Y. Sun, R. Xiong, Q. Zhu, J. Wu, and J. Chu. Balance motion generation for a humanoid robot playing table tennis. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 19–25. IEEE, 2011.
- [134] R. Tajima, D. Honda, and K. Suga. Fast running experiments involving a humanoid robot. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1571–1576. IEEE, 2009.
- [135] R. Tajima and K. Suga. Motion having a flight phase: Experiments involving a one-legged robot. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*,

- pp. 1726–1731. IEEE, 2006.
- [136] S. Takamuku, A. Fukuda, and K. Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3212–3217. IEEE, 2008.
- [137] T. Takubo, K. Inoue, and T. Arai. Pushing an object considering the hand reflect forces by humanoid robot in dynamic walking. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1706–1711. IEEE, 2005.
- [138] T. Tamada, W. Ikarashi, D. Yoneyama, K. Tanaka, Y. Yamakawa, T. Senoo, and M. Ishikawa. High-speed bipedal robot running using high-speed visual feedback. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 140–145. IEEE, 2014.
- [139] J. Tani. An interpretation of the ‘self’ from the dynamical systems perspective: A constructivist approach. *Journal of Consciousness Studies*, 5(5-6):516–542, 1998.
- [140] S. Traversaro, A. Del Prete, S. Ivaldi, and F. Nori. Inertial parameters identification and joint torques estimation with proximal force/torque sensing. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2105–2110. IEEE, 2015.
- [141] N. G. Tsagarakis, S. Morfey, G. M. Cerda, L. Zhibin, and D. G. Caldwell. Compliant humanoid coman: Optimal joint stiffness tuning for modal frequency control. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 673–678. IEEE, 2013.
- [142] H. Tsukagoshi, M. Sasaki, A. Kitagawa, and T. Tanaka. Design of a higher jumping rescue robot with the optimized pneumatic drive. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1276–1283. IEEE, 2005.
- [143] Y. Umetani and K. Yoshida. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized jacobian matrix. *Robotics and Automation*, 5(3):303–314, 1989.
- [144] J. F. Veneman, R. Ekkelenkamp, R. Kruidhof, F. C. van der Helm, and H. van der Kooij. A series elastic-and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots. *The international journal of robotics research*, 25(3):261–281, 2006.
- [145] G. Venture, K. Ayusawa, and Y. Nakamura. Motion capture based identification of the human body inertial parameters. In *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4575–4578. IEEE, 2008.

-
- [146] B. Verrelst, R. V. Ham, B. Vanderborght, F. Daerden, D. Lefeber, and J. Vermeulen. The pneumatic biped “Lucy” actuated with pleated pneumatic artificial muscles. *Autonomous Robots*, 18(2):201–213, 2005.
- [147] M. Vukobratović and B. Borovac. Zero-moment point-thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robots*, 1(01):157–173, 2004.
- [148] J. P. Whitney, T. Chen, J. Mars, and J. K. Hodgins. A hybrid hydrostatic transmission and human-safe haptic telepresence robot. *Disney Research*, 2016.
- [149] Y. Yamakawa, A. Namiki, and M. Ishikawa. Simple model and deformation control of a flexible rope using constant, high-speed motion of a robot arm. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2249–2254. IEEE, 2012.
- [150] K. Yokoyama and Y. Yamamoto. Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities. *PLoS Computational Biology*, 7(10):e1002181, 2011.
- [151] E. Yoshida, O. Kanoun, C. Esteves, and J.-P. Laumond. Task-driven support polygon reshaping for humanoids. In *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 208–213. IEEE, 2006.
- [152] K. Yoshida. Engineering test satellite vii flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit. *The International Journal of Robotics Research*, 22(5):321–335, 2003.
- [153] S.-k. Yun, A. Goswami, and Y. Sakagami. Safe fall: Humanoid robot fall direction change through intelligent stepping and inertia shaping. In *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 781–787. IEEE, 2009.
- [154] 安積欣志. 高分子アクチュエータ. 日本ロボット学会誌, 21(7):708–712, 2003.
- [155] 浦井健次, 仲田佳弘, 中村泰, 石黒浩. 物理的に連結された空気圧シリンダの連動駆動を利用したヒト型ロボットの肩関節機構の開発. 日本ロボット学会誌, 34(9):623–630, 2016.
- [156] 岡田昌史, 大里健太, 中村仁彦. 非線形力学系のアトラクタ設計によるヒューマノイドロボットの運動創発. 計測自動制御学会論文集, 41(6):533–540, 2005.
- [157] 久保哲也, 木塚朝博, 斎藤実, 武藤健一郎, 香田郡秀, 佐藤成明. 剣道における足構えに関する研究. *Research Journal of Budo*, 33(3):12–25, 2001.
- [158] 空閑護, 西脇光一, 福本康隆, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允. ヒューマノイドに

- における全身リーチング動作の高速生成法. ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2003:96, 2003.
- [159] 国田賢治, 藤原勝夫. 5. 頸部前屈に伴う眼球運動反応時間の短縮と脳波との関係. 体力科学, 45(6):607, 1996.
- [160] 細田耕. 柔らかヒューマノイド: ロボットが知能の謎を解き明かす. 化学同人, 2016.
- [161] 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊. 高速多指ハンドシステムを用いた布の動的折りたたみ操作. 日本ロボット学会誌, 30(2):225–232, 2012.
- [162] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄. 跳躍ロボットのための非対称型閉ループ柔軟カタパルト. 日本ロボット学会誌, 26(4):363–371, 2008.
- [163] 山藤和男, 小林剛, 河村隆. 猫ひねり動作の解明とロボットによる猫ひねりの実現. 日本ロボット学会誌, 10(5):648–654, 1992.
- [164] 市川泰久, 望山洋, 藤本英雄. 物体投擲のためのねじりばねの直列構造に基づく瞬発力発生装置. 日本ロボット学会誌, 29(1):47–54, 2011.
- [165] 神崎秀, 岡田慧, 稲葉雅幸. 予測可能な衝撃力に対する予見制御に基づくヒューマノイドの身構え行動制御. 日本ロボット学会誌, 25(7):1068–1073, 2007.
- [166] 杉山勇太, 平井慎一. 柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍. 日本ロボット学会誌, 24(3):378–387, 2006.
- [167] 石黒浩, 平田オリザ. ロボット演劇. 日本ロボット学会誌, 29(1):35–38, 2011.
- [168] 石川綾乃, 市原美樹, 稲数幸祐, 福田英昭. 感情認識ロボット. 電気学会誌, 136(4):230–233, 2016.
- [169] 石川正俊. 進化するビジョン 超高速ビジョンの展望. 日本ロボット学会誌, 23(3):274–277, 2005.
- [170] 石田祐太, 望山洋. ゴムを利用したパンタグラフ型繰り返し瞬発力発生機構. 日本ロボット学会誌, 31(5):491–496, 2013.
- [171] 浅田稔, 石黒浩, 國吉康夫. 認知ロボティクス 認知ロボティクスの目指すもの. 日本ロボット学会誌, 17(1):2–6, 1999.
- [172] 村上弘記. 自動化システムの最近の動向と今後の展開. 計測と制御, 54(12):889–894, 2015.
- [173] 太田順, 倉林大輔, 新井民夫. 知能ロボット入門 動作計画問題の解法. コロナ社, 2001.

- [174] 竹越智也, 萩原将文. ロボット漫才自動生成システム. 日本感性工学会論文誌, 15(1):47–54, 2016.
- [175] 中岡慎一郎, 山野辺夏樹, 比留川博久, 山根克, 川角祐一郎. 分散コンポーネント型ロボットシミュレータ openhrp3. 日本ロボット学会誌, 26(5):399–406, 2008.
- [176] 中西康二. 基礎から学ぶ空気圧技術. 株式会社 オーム社, 2001.
- [177] 中村仁彦. 非ホロノミックロボットシステム 第1回非ホロノミックなロボットって何? 日本ロボット学会誌, 11(4):521–528, 1993.
- [178] 中村仁彦. 非ホロノミック系の制御 非ホロノミック系制御研究の展望. 計測と制御, 36(6):384–389, 1997.
- [179] 中村仁彦, O. J. Sjørdalen, 鄭宇眞. 非ホロノミック・マニピュレータの理論的設計と非線形制御. 日本ロボット学会誌, 13(5):674–682, 1995.
- [180] 中村太郎. 空気圧人工筋肉を用いたバックドライバブルな可変剛性機構とその制御. 日本ロボット学会誌, 31(6):572–576, 2013.
- [181] 塚越秀行, 佐々木正志, 北川能, 田中崇裕. 瓦礫跳躍高度の向上を目指した空圧ジャンピングの特性解析. 計測自動制御学会論文集, 40(8):859–866, 2004.
- [182] 田所諭, 林真樹, 真部靖弘, 中見至宏, 高森年. 人間と共存協調するロボットのための回避行動の生成 第2報移動ロボットの移動障害物回避. 日本機械学会論文集 C 編, 63(606):499–505, 1997.
- [183] 田村雄介, 濱崎峻資, 山下淳, 浅間一. 環境に応じた人間の移動予測に基づく移動ロボットの人物回避. 日本機械学会論文集 C 編, 79(799):617–628, 2013.
- [184] 並木明夫. 高速マニピュレーション. 日本ロボット学会誌, 31(4):358–363, 2013.
- [185] 米田完, 坪内幸司, 大隅久. はじめてのロボット創造設計 (共著). 講談社, 2001.
- [186] 望山洋, 山田篤史, 藤本英雄. 閉ループ弾性体による瞬発力発生機構. 日本ロボット学会誌, 29(6):492–495, 2011.
- [187] 鈴木高宏, 中村仁彦. 非ホロノミック宇宙ロボットのスパイラルモーション. 日本ロボット学会誌, 13(7):1020–1029, 1995.