

論文

ビジョンベースの卓球ジャグリングロボットの設計、モデリング、および実験的検証

111112, Yunfeng Ji, Bangsen Zhang, Yue Mao, Han Wang, Xiaoyi Huang, Lingling Zhang*

1 上海理工大学 健康科学・工学部、中国 上海 200093; ji_yunfeng@usst.edu.cn (Y.J.); 223332638@st.usst.edu.cn (B.Z.); 223332622@st.usst.edu.cn (Y.M.); 2235062023@st.usst.edu.cn (H.W.); 213332746@st.usst.edu.cn (X.H.)

2 上海财经大学 体育学科、中国 上海 200433

*対応: zhang.lingling@mail.shufe.edu.cn

要約: 本論文は、卓球ジャグリングタスク用にカスタマイズされた新しいビジョンベースロボットを開発している。具体的には、ロボットは250フレーム/秒で動作する2台の産業用カメラで構成される感知システムを備えている。提案される画像処理アルゴリズムにより、ロボットは卓球ボールをバランスさせながらバウンド高さを制御することができる。ロボットはパラレル構造設計を採用し、エンドエフェクタは3つのボールジョイントを使用して並列メカニズムの自由度 (DOF) を増加させる。さらに、このロボットシステム用に明示的にカスタマイズされた制御スキームを設計する。異なるジャンプ高さでジャグリングロボットの有効性を示すための広範なリアルタイム実験を実施する。さらに、固定されたプリセットバウンド高さを一貫して維持する能力が実証される。これらの実験結果は、開発されたロボットシステムの有効性を確認している。

キーワード: ジャグリングロボット; ロボット設計; パラレル構造; 逆運動学

MSC: 70E60



引用: Ji, Y.; Zhang, B.; Mao, Y.; Wang, H.; Hu, X.; Zhang, L. Design, Modeling, and Experimental Validation of a Vision-Based Table Tennis Juggling Robot. *Mathematics* 2024, 12, 1634. <https://doi.org/10.3390/math12111634>

学術編集者: Daniel-Ioan Curia

受付: 2024年4月22日

改訂: 2024年5月21日

受理: 2024年5月22日

発行: 2024年5月23日



著作権: ©2024 著者により。ライセンス: MDPI, パーセル, スイス。この記事は、Creative Commons Attribution (CC BY) ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) の利用規約の下で配布されるオープンアクセス記事である。

1. はじめに

ジャグリングは、人間の器用さタスクの古典的な例である。ジャグリングにはさまざまな形態があり、その中で卓球ジャグリングは、卓球ボールを繰り返し重力に対してラケットで打つことを含む。ほとんどの人が比較的簡単にラケットからいくつかのバウンドを得ることができるが、各ボールの位置の予測不可能性は、一貫した接触を維持することができないことが多い。さらに、十分な経験がなければ、ボールの軌跡を正確に判断することは課題となる。

ロボットシステムがこれらのラケットアクロバティクスを達成できるようにすることは、困難であり、超人的な器用さを必要とする可能性がある。このようなシステムは、救急車、船舶、およびドローン救助などの分野での応用の可能性を持つ。

近年、多くの研究者が、様々なロボット構造と制御方法を通じてロボット卓球ジャグリングを探索している。ロボットアームをアクチュエータとして使用するジャグリングタスクは、[1–3]で実装されており、ロボットアームは独立して、また協調的にジャグリングを実行する。具体的には、アンセンテッドカルマンフィルタを備えた物理モデルを持つ理想的なモデルが[4]で提案されており、これは衝突速度をよく予測し、1人間によって投げられたボールをキャッチするために採用されている。[2]では、非線形最小二乗法が、2つのパドル/ハンド間でジャグリングするための次のインラインショットのラケット構成を計算するために設計されている。その後、SE(3)でラケットの最適軌跡が開発されている。[4]では、ボールの速度をz方向でのみ予測する方法が提案されており、ボールの位置は常にx-y平面で追跡される。3全体的な軌跡を予測する方法とは異なり、この方法は事前にジャグリングするために必要なパラメータの数が少なくなっている。[4,5]では、クアッドロコプターがボールを打つために採用されている。このタイプのロボットでは、困難はそれがアンダーアクチュエーション非線形動的モデルであり、制御アルゴリズム設計が困難であることである。したがって、ジャグリング回数が不十分で、ジャグリング効果が悪い可能性がある。

ラケット-ボールシステムにインスピレーションを受けて、Cassieシステムは[]でCassieのバランスを維持しながらジャグリング動作を実現するための研究プラットフォームとして採用されている。[6]では、さらに、最適化とPDに基づく2つの制御器の安定性がポアンカレ解析を通じて証明されている。[7]では、ブラインドジャグラーが導入されており、ここではジャグリングを達成するためにビジョン、圧力、またはその他のセンサは必要とされない。これらのロボットは主にロボットモデルの精度に依存している。[,]では、ジャグリングロボットが開発されており、これは完全に制約されないボールを89センサなしで垂直にバウンスさせることができる。ロボットはリニアモーターで駆動され、機械加工されたアルミニウムパドルを備えている。放物線パドルの曲率は、ボールがパドルとの衝突時に進行を遅くしながら、ボールがパドルから落ちるのを防ぎ、ボールのピーク高さを安定させる。この「ブラインド」ジャグリングロボットの形式に基づいて、振り子ジャグラーが[10,11]で設計されており、ここではパドルはボールをジャグリングするためにスウィングペンジュラムにマウントされている。ペンジュラムは4リンク機構で構成され、ジャグリング中、制約されないボールは水平方向に最大1 m移動することができ、衝突間のピーク高さは1.1 mである。ペンジュラムとパドルはロボット制御に使用され、本質的にペンジュラムのチップでの移動質量とボール間の動的結合を形成する。さらに、最適制御はパドル動作を計算するために適用され、ボールと同期し、フィードバックはフィードバックは測定された状態を適切なパドル動作にマップするルックアップテーブルを導入する。

これらの進歩にもかかわらず、いくつかの困難な質問は依然として解決されていなく、より深い調査を必要としている。前述のクアドロコプターおよび二足歩行ロボットシステムなどの比較的複雑なシステムの場合、ジャグリング行動を実施することを考えなくても、自己制御安定性を確保することは困難である。さらに、ブラインドジャグリングロボットシステムなどの比較的単純なシステムの場合、より良い制御性能を達成するために、センサは必ずしもフィードバックとして使用されない。上記の観察にインスピレーションを受けて、シミュレーションで安定なジャグリングロボットシステムを開発する。本論文では、卓球ジャグリングタスク用にカスタマイズされた新しいビジョンベースロボットを提示する。具体的には、ロボットは250フレーム/秒 (FPS) で動作する2台の産業用カメラで構成される感知システムを備えている。提案される画像処理アルゴリズムにより、ロボットは卓球ボールをバランスさせながらバウンス高さを制御することができる。ロボットはパラレル構造設計を採用し、エンドエフェクタは3つのボールジョイントを使用して並列メカニズムの自由度を増加させる。

それに応じて、このロボットシステム用の制御スキームを提案する。異なるバウンス高さでのジャグリングロボットの有効性を示すための広範なリアルタイム実験を実施する。

2. 卓球ジャグリングロボット設計

このセクションでは、図 1 に示すように、卓球ジャグリングロボットシステムを紹介する。システム全体は、ビジョンモジュール、実行モジュール、および制御モジュールの3つの主要なモジュールで構成されている。特に、ビジョンモジュールは固定の両眼視システムであり、2台のカメラはロボットの直上に固定され、卓球ボールの移動軌跡を検出する。実行モジュールは並列ロボットであり、ベース、プラットフォーム、および3つの同一の並列メカニズムで構成される。ベースにはロボットの全体的なフレームワークが含まれている。ジャグリングプラットフォームは、ロボットのベースの直上に位置し、その中心はベースの中心点と垂直方向に配置されている正六角形である。各並列リンケージは3つのジョイントで構成され、終端ジョイントはボールジョイントで、その他は回転ジョイントである。システム全体はコンピュータで制御される。カメラはプログラムのセンサとしてこのコンピュータに接続される。コンピュータはカメラからの入力を処理してフィードバック情報を取得し、その後、Ethernet-CANモジュール経由でロボットに制御コマンドを送信する。画像データの処理とロボット動作の制御を同時に実行するために、次のPC構成を選択する：12世代Intel(R)Core(TM)i5-12400 2.50GHzのCPU、15.6GBのメモリ、およびNVIDIA TITAN GPU。さらに、ソフトウェアソリューションはC#プログラミング言語 ([https://en.wikipedia.org/wiki/C_Sharp_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/C_Sharp_(programming_language))) 2024年1月1日アクセス) を使用して作成され、.NET 7.0環境でコンパイルされている。

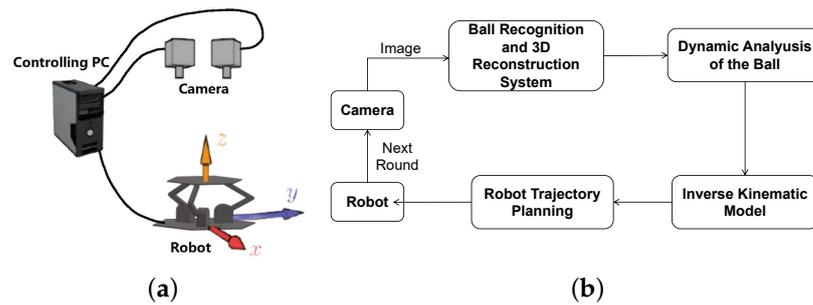


図1.ab() ビジョンベースの卓球ジャグリングロボット。() 卓球ロボットジャグリングシステムの構造。

3.画像処理

ビジョンシステムの目的は、卓球ボールの実時間移動画像を収集することである。安定なジャグリングを達成するために、ロボットはビジョンシステムを通じて、卓球ボールの識別、空間的位置決定、および軌跡予測を完了する必要がある。これらのタスクの中で、卓球ボールの空間的位置決定は基本的である。ロボットシステム全体は高いリアルタイム性能を必要とするため、60~300 FPS範囲内でのカメラフレームレートの増加は、対応する画像データの増加により、卓球軌跡認識の一貫性に肯定的な影響を与える。しかし、フレームレートが250 FPSを超える場合、一貫性の向上は無視できる程度になり、代わりに認識速度がさらに影響を受ける。比較実験を実施した後、1440 × 1080の解像度と250 FPSのフレームレートを持つ2台の高速黒白カメラを使用して両眼視システムを確立することを選択する。さらに、デカルト座標系で卓球ボールの正確なパラメータを取得するために、カメラが引き起こす歪みを補正し、カメラピクセル座標と3次元(3D)座標間の関係を確立する。両眼カメラは確立されたキャリブレーションモデルに従ってキャリブレーションされる[12]。卓球検出はキャリブレーション後に達成される。

実験では、白卓球ボールを使用する。最初に、画像全体をグレースケールに変換し、特定の閾値を選択して画像を二値化する。背景差分も、画像からの干渉を除去するために採用される。前処理および後処理の両方の画像は図2に示されている。さらに、適切な円形度と輪郭面積が選択されて卓球ボールの円形輪郭が取得され、輪郭の最小外接円の重心が、画像座標系での卓球ボールの中心の座標として計算される。画像サイズを削減するために動的関心領域(ROI)アルゴリズムを実装する。このアプローチは、画像あたりの処理時間を20 msから2 msに大幅に削減する。

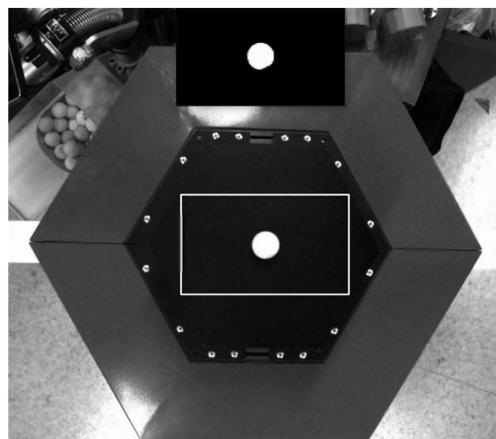


図2.画像処理結果。

両眼カメラシステムでは、卓球ボールの3D位置決定が達成される。全体的な3D位置決定モデルは図 3に示されており、卓球ボールの画像座標は (u, v) 。カメラ1では、カメラ2では、エピポラ拘束により、 $rll = uu$ 左右の画像での同じ目標のX軸座標は等しい、すなわち、 crl カメラ1とカメラ2での卓球ボール間の座標差は、次のように表現できる。

$$d = v_l - v_r. \tag{1}$$

これら2つのカメラ間のベースライン長と焦点距離は既知であるため、次の方程式を相似三角形の原理によって取得することができる： γ

$$\frac{\gamma}{z_c} = \frac{(\gamma + v_r) - v_l}{z_c - f} \tag{2}$$

ここで、 z_c はZ軸方向の座標である。次に、カメラ1座標系での卓球ボールの座標を導出することができる。 cc

$$z_c = \frac{\gamma f}{v_l - v_r} = \frac{\gamma f}{d}. \tag{3}$$

同様に、カメラ1座標系での卓球ボールの座標は、次のように得られる。 -- (u, v) $uuzvzvz$

$$x_c = -\frac{l}{f} \frac{o}{c} \text{ and } y_c = -\frac{l}{f} \frac{o}{c} \tag{4}$$

ここで、 x_c, y_c はX軸方向とY軸方向に沿った座標であり、それぞれ、 $cccc (u, v)$ は、画像座標系での画像中心の座標である。 oo

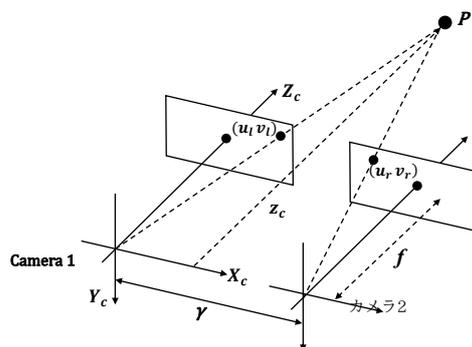


図3. 両眼3D位置決定原理。

次に、カメラ1座標系での卓球ボール座標は、世界座標系に変換され、そこで[13]で提示されたPerspective-N-Point (PNP) 方法が適用される。最後に、同次変換により、世界座標系での卓球ボールの補正された3D座標を取得することができる。

4. 逆運動学

並列ロボットの場合、逆運動学は、ロボットのエンドエフェクタの望ましい位置、向き、および運動学パラメータに基づいて、各ジョイントの角度または変位を計算する。すなわち、逆運動学は、ロボットのエンドエフェクタから各ジョイントの状態を導出することを含む。逆運動学問題の解は、ロボットシステムが必要な正確な動作と操作を達成することを可能にするため、並列ロボットの制御に非常に重要である。

ロボットの3Dモデルと数学モデルは、図4aおよび4bに示されている。卓球ジャグリングロボットは、世界座標系O-XYZに基づいて計算される。点A1、A2、およびA3は3つのモータの出力シャフト上に位置し、これらはすべて回転ジョイントであり、正三角形を形成する。O-XYZの原点O

A座標系は、この正三角形の中心にあり、点は2Y軸上にあり、Z軸はこの正三角形に垂直である。点 B_1, B_2, B_3 、および C_1, C_2, C_3 は、アクティブリンクとパッシブリンク間の回転ジョイントである。231 C_1, C_2, C_3 および P で形成される平面は、リンク下のジャグリングパドルに接続された3つのボールジョイントで形成される平面である。23これら3つの点はボールジョイントであり、別の正三角形を形成し、 P がこの正三角形の中心に位置する。

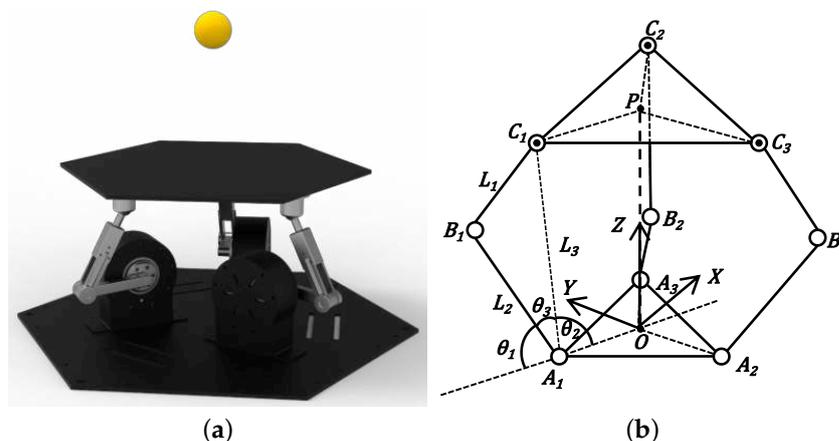


図4.ab() 卓球ジャグリングロボットの3Dモデル。() 卓球ジャグリングロボットの運動学図。

上記のロボットモデルに従い、逆運動学を解く過程は以下の通りである：世界座標系 $O-XYZ$ では、3つの出力シャフト上の3つの点の座標は A_1, A_2, A_3 一定であり、ロボットの初期状態が指定される。21A初期状態では、 C_1, C_2, C_3 、および P の世界座標系に対する座標も一定であり、事前に既知である。23したがって、並列アームの1つを例として取得すると、次を得る。 $\vec{r}_{C_1} = \vec{r}_{A_1} + L_1 \vec{e}_1$

$$\vec{r}_{C_1} = \vec{r}_{A_1} + L_1 \vec{e}_1 \tag{5}$$

ここで、点と間に形成されたベクトルを示す。逆運動学では、望ましい構成が取得される。 α, β, γ したがって、ジャグリングパドルの同次変換行列は、

$$M = \begin{bmatrix} R & Q \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

R, Q ここで、 α, β, γ は世界座標系に対する回転行列と並進行列であり、 0 はすべての要素が0に等しい3次元の行ベクトルである。

各ジャグリングプロセス中、ジャグリングパドルの姿勢および3つのボールジョイントの位置は絶えず変化する。したがって、ジャグリング中のボールジョイント位置の変化は、次のように説明できる。 $\vec{r}_{C_1} = \vec{r}_{A_1} + L_1 \vec{e}_1$

$$\vec{r}_{C_1} = \vec{r}_{A_1} + L_1 \vec{e}_1 \tag{7}$$

$$\vec{OP}^* = \vec{OP} \times M \tag{8}$$

ここで、初期状態でのボールジョイントのベクトルを表し、 \vec{OP}^* は姿勢行列による変換を通じた各ジャグリング動作中のボールジョイントのベクトルである； \vec{OP} および M は、同次変換前後のジャグリングパドルの中心を表すベクトルであり、それぞれである。

ロボットの関節の座標は常に既知であるため、図 4bの数学モデルに従い、余弦定理を使用して θ を決定することができる：2

$$\theta_2 = \arccos \frac{|\overrightarrow{OA_1}|^2 + |\overrightarrow{A_1C_1}|^2 - |\overrightarrow{OC_1}|^2}{2|\overrightarrow{OA_1}||\overrightarrow{A_1C_1}|} \tag{9}$$

ロボットリンクの長さは一定であるため、余弦定理を使用して θ を計算する。3

$$\theta_3 = \arccos \frac{|\overrightarrow{A_1B_1}|^2 + |\overrightarrow{A_1C_1}|^2 - |\overrightarrow{B_1C_1}|^2}{2|\overrightarrow{A_1B_1}||\overrightarrow{A_1C_1}|} \tag{10}$$

θ θ なお、およびは理論的には複数の解を持つ。構造的制限により、 θ θ θ θ とおよびが鋭角であることが容易に観察される。その結果、は逆運動学の結果である。その後、同じ議論を模倣して、他の2つの並列リンクの角度も決定できる。23 +2323

CC、およびおよびで形成される平面とジャグリングパドル間には垂直距離と向きのエラーが存在する。したがって、この効果を排除するには静的誤差方程式が必要である。静的誤差行列は、T 3

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} & \mathbf{q} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

ここで rは設定されたジャグリング着地位置の位置と姿勢に関連している。この実験では、着地位置はジャグリングパドルの幾何学的中心に位置することが選択されている。qしたがって、回転行列の9つのパラメータはすべてゼロに等しい；は、2つの平面間の距離に関連し、00に選択される。T

5.ロボット制御方法

ジャグリングロボットの制御の場合、ロボットがジャグリング動作を実行することを制御することに加えて、ロボットが卓球ボールをバランスさせることを制御することも必要である。卓球ボールは中断中の抵抗と衝突による変形により運動エネルギーを失うため、制御プロセス中にボールにエネルギーを提供する必要がある。したがって、ジャグリングを制御する場合、ロボットは、特定の時間にある程度上向きに移動するコマンドを実行する必要がある。ロボットのジャグリングパドルはアルミニウムで製造されているため、卓球ボールがアルミニウムパドルから跳ね返るモデルは、次のように表現できる。 -->-->-->-->

$$out = * in + \tag{12}$$

-->Kここで、はボールが平面と衝突した後の速度損失係数を表す対角行列である。 --> -->BVは衝突後の速度補償バイアスであり、は平面と衝突するときの入射速度であり、in -->Vは衝突後の出射速度である。outジャグリング中、最大速度変化の方向はZ軸であるため、Z軸方向の速度変化のみを考慮する必要がある。したがって、これを次のように簡略化できる。

$$\overrightarrow{V_{Z_{out}}} = k * \overrightarrow{V_{Z_{in}}} + b. \tag{13}$$

卓球ボールとアルミニウムパドルの衝突係数を取得することが困難であるため、卓球ボールと卓球台間の衝突および反発モデルを参照する。[14,15]に従い、卓球ボールとアルミニウムパドル間の衝突係数は定数として決定される。この実験での衝突係数の値は -- = k b0.95および0である。ロボットは、この損失=zzzに基づいて、ジャグリングパドルの移動を決定する0.037で、ここで、はジャグリング中に設定される固定高さである。 δhh

ジャグリング中に機械誤差が発生する可能性があり、卓球ボールが着地する場所に不確実性が生じる。ロボットがセンサフィードバックに依存せずにジャグリング動作の実行のみで制御される場合、卓球ボールはいくつかのバウンス後、ジャグリングパドルの範囲を超える。したがって、ジャグリング中にボールの着地位置を制御する必要がある。安定なジャグリングを達成するために、比例微分 (PD) 制御器が適用され、ボールの着地位置が補正される。まず、目標位置はジャグリングパドルの幾何学的中心に設定され、エラーはボールの実時間位置と目標位置間の距離として定義される。制御器の出力は、ジャグリングパドルのX軸およびY軸周りの傾斜角であり、各継続的なジャグリング中に実際の着地位置が目標位置に徐々に近づくようにする。ボール調整システムとは異なり、ジャグリングロボットのジャグリングパドルの傾斜角は制限されており、これはPD制御器の全出力が制限される必要があることを意味している。制御プロセス全体を通じて、ロボットの動きの軌跡を計画して、ロボットの関節速度が継続的であることを確保する必要がある。速度曲線計画では、T型曲線とS型曲線は古典的な計画方法である。この作業では、関節の速度を最適化するためにT型曲線を使用する。一般的に、T型曲線は、加速、一定速度、および減速の3つのステージで構成されている。zzロボットの所定動作時間の場合、は計画における重要な要因になる。短い短い定速フェーズになり、長い長い定速フェーズになる。 $\delta \delta z$ これはパドル速度がおよび時間に関連していることを意味している。ジャグリング動作全体を通じて、ロボットが主に定速フェーズに留まることを確保するため、テスト後、=zz0.037は適切な高さである。さらに、ジャグリングロボットの高いリアルタイム要件により、 $\delta h3$ つのジョイントすべてが高精度で高性能のサーボモータを使用する。ロボットの全体的な制御フレームワークは図 5に示されている。

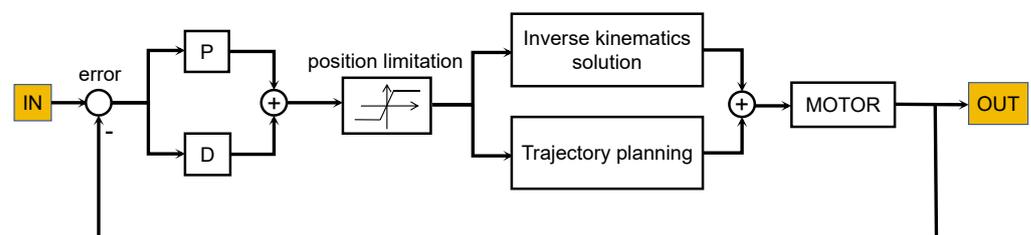


図5.卓球ジャグリングロボットの制御フレームワーク。

ロボットシステムで採用されている詳細なアルゴリズムは、以下のようにまとめられている。まず、ステレオカメラをキャリブレーションし、異なる照明条件下での複数の画像を統計分析して、画像内の白卓球ボールの色閾値を取得して、画像を二値化する。画像の干渉を排除するために、背景差分方法を提案して大面積のピクセル干渉を排除する；同時に、複数の形態学的開き操作と収縮および膨張操作を使用して、二値化された画像で処理されていない個別のピクセル干渉を排除する。動的ROIはパフォーマンス最適化に使用され、目標検出時間は2ms以内に制御してリアルタイム要件を満たす。その後、ステレオ3次元位置決めアルゴリズムを使用してボールの空間位置を計算し、PNP解を通じてカメラ座標系でのボール座標を世界座標系に変換する；座標変換の誤差は実験を通じて計算され、同次変換を通じて補正される。視覚システムは、卓球ボールの位置情報をフィードバック信号として提供するため、実際の位置と期待される位置間の誤差が計算される。PD制御器を使用して、ロボットの姿勢を調整するために総制御出力が取得され、出力部分はバツルの傾斜角である。逆運動学はロボットについて幾何学的方法を使用して計算され、バツルの既知の傾斜角に従い、各モータが必要とする動作の角度を取得することができる。ロボットの動き状況について、T型曲線計画方法を使用する。これら2つのアルゴリズムを組み合わせることで、ロボットを指定された位置に指定された姿勢と速度で到達するように制御できる。

ロボットの動き状況について、T型曲線計画方法を使用する。これら2つのアルゴリズムを組み合わせることで、ロボットを指定された位置に指定された姿勢と速度で到達するように制御できる。

6.物理実験

本セクションでは、以下の2つの実験を通じてロボットシステムのパフォーマンスを評価する：(1) 異なる高さでの各ジャグリングの卓球ボール着地位置を検証し、異なる高さでの卓球ボール着地マップのパターンを比較する；(2) プリセット目標ジャグリング高さと各ジャグリングの実際のジャグリング高さ間の誤差を検証する。

ロボットの全体的な実験環境は図 6 に示されている。まず、標準4 cm直径の白卓球ボールを使用して、六角形ジャグリングパドルで実験を実施する。この形状のジャグリングパドルを設計する目的は、3つの並列リンケージの位置と一致させ、ビジョンシステムで重要なポイントを識別しやすくすることである。各アクティブリンケージの長さは7 cmであり、パッシブリンケージの長さは9.4 cmである。さらに、ボールジョイントで形成される平面とジャグリングパドルの平面間の垂直距離は3 cmである。定格トルク4 Nmおよびピークトルク12 Nmのサーボジョイントモータを使用する。サーボモータは、定格速度が240回転毎分 (rpm) のギア減速比7.75で装備されている。250 FPS産業用カメラ2台がロボットから1 m上に取り付けられ、カメラの合計視野がロボット全体をカバーすることを確保している。

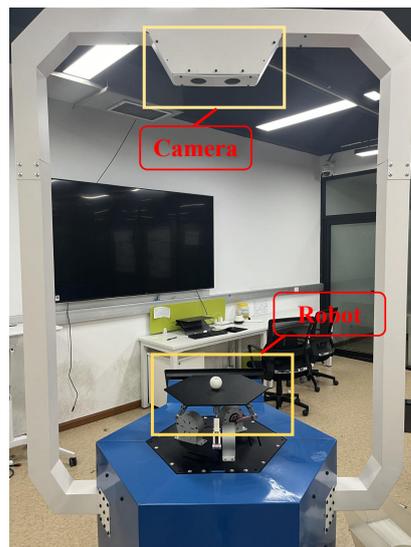


図6.ロボット実験環境および機器。

この実験では、目標点がジャグリングパドルの中心に設定され、10 cm、30 cm、および50 cmの3つの高さ値が設定される。ジャグリング回数は、各実験に対して100に固定される。ロボットモデルでは、ロボットが静止状態にあるとき、ジャグリングパドルと世界座標系のXOY平面間の距離は18.1 cmである。したがって、全体的なジャグリング高さ曲線も18.1 cmだけオフセットする必要がある。実験結果と対応するプロセスは、図 7 および 8 に示されている。各ジャグリング着地点の選択については、以下の方法を採用する。2台の高速カメラでキャプチャされた画像情報は、継続的で密度の高い離散データを取得するために処理される。着地点の選択には、卓球ボールの軌跡の分析が含まれる。継続的な離散データのセット内で、局所最小値を識別し、対応する2次元座標を着地点と見なす。これらの結果は、ジャグリングパドルの姿勢を制御することで、ジャグリングの有効性を確保できることを示している。ただし、設定されたジャグリング高さが増加するにつれて、卓球着地位置の分布がより分散される。3つの誤差マップでは、10 cm、30 cm、

および50 cmの高さ値に対応する最大誤差は、それぞれ250 mm²、2500 mm²、および6000 mm²である。実際の着地位置の平均と設定された目標位置の偏差は、高さが増加するにつれて増加することが観察できる。

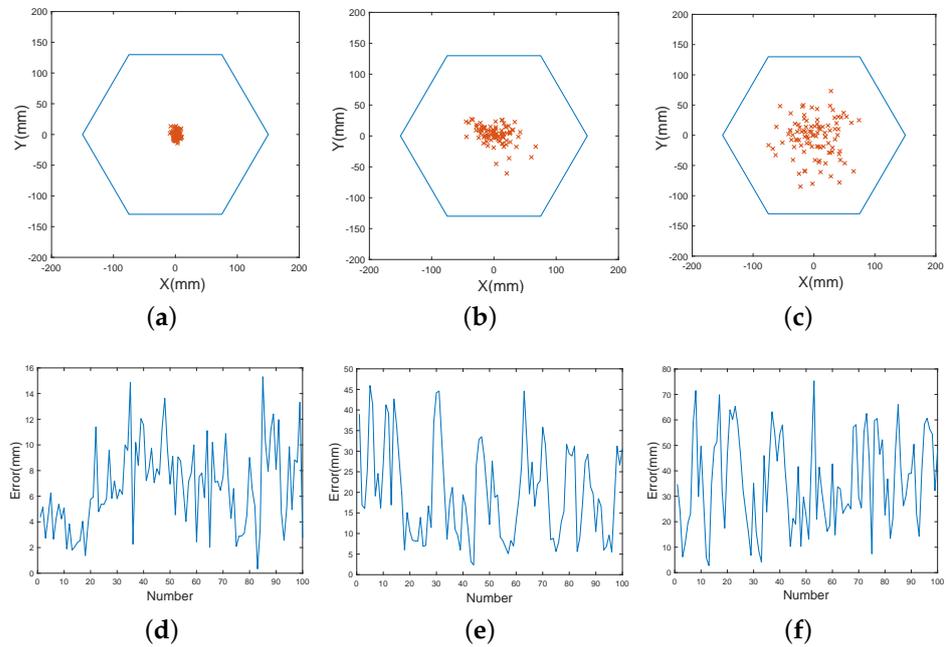


図7.a異なる高さでの着地位置と位置誤差。(b)c高さ10 cmでの着地位置。(d)高さ30 cmでの着地位置。(e)高さ50 cmでの着地位置。(f)高さ10 cmでの誤差。(g)高さ30 cmでの誤差。(h)高さ50 cmでの誤差。

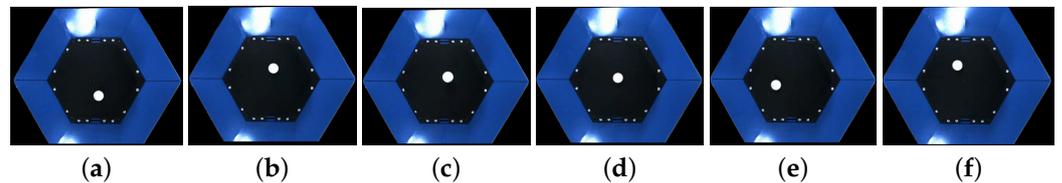


図8.aロボットがボールを継続的にジャグリングするとき記録された6つの着地点。(b)cde着地位置1。(d)着地位置2。(e)着地位置3。(f)着地位置4。(g)着地位置5。(h)着地位置6。

2番目の実験では、目標位置もジャグリングパドルの中心に設定し、10 cm、30 cm、および50 cmの3つの高さ値を設定する。各実験は30秒間続く。実験結果と対応するプロセスは、図 9および 10に、それぞれ示されている。同様に、最大高さの選択には離散データからの抽出も含まれ、選択された局所最大値は最大高さ値を表す。これらの結果は、ジャグリングロボットが、ボールがパドルから離れないことを確保しながら、設定された高さから10%のエラー範囲内で各ジャグリングを制御できることを示している。卓球ボールは移動中に常に空気抵抗を受け、ジャグリングパドルとの衝突中に運動エネルギーを失う。これらにより、自由落下する卓球ボールは最終的に静止する。したがって、各ジャグリングにはジャグリングパドルが卓球ボールに逆衝突インパルスを加えて、そのエネルギー損失を補償し、設定された高さ値付近で安定させる必要がある（上述のように、 δh ）。

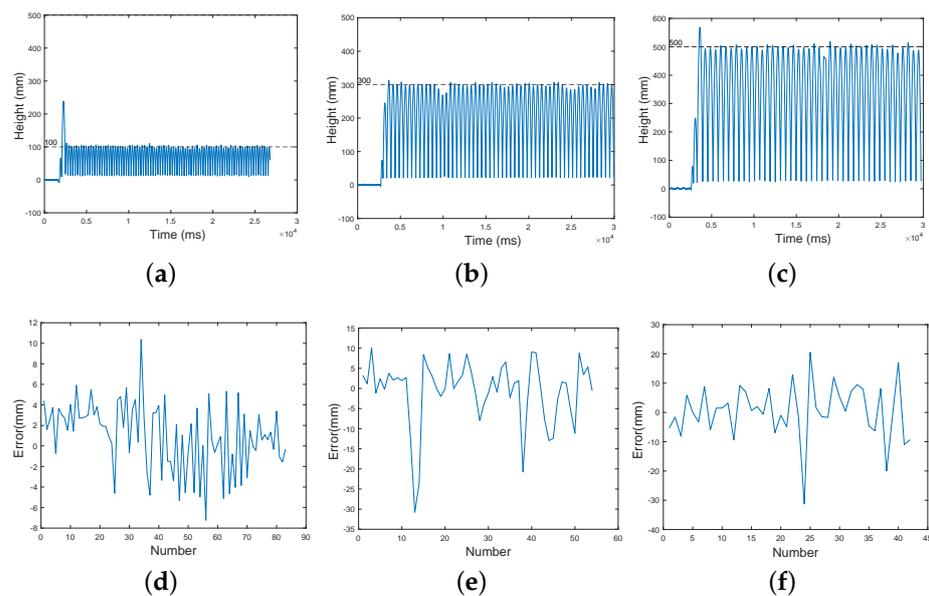


図9. a異なる高さでの高さ曲線と高さ誤差。()高さbc10 cmでのジャグリング高さの高さ曲線。()高さ30 cmでのジャグリング高さの高さ曲線。()高さ50 cmでのジャグリング高さの高さ曲線。de()高さ10 cmでのジャグリング高さの高さ誤差。()高さ30 cmでのジャグリング高さの高さ誤差。f()高さ50 cmでのジャグリング高さの高さ誤差。

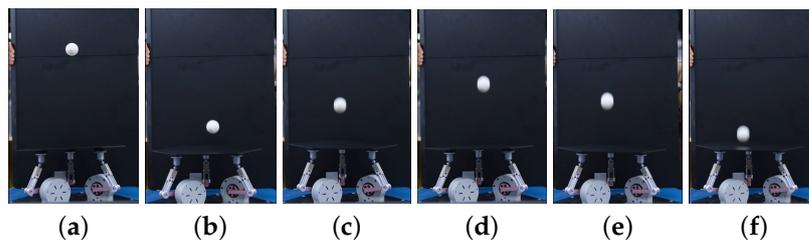


図10. ロボットによる継続的なボールジャグリング中に記録された高さ。(a) ステージ1。(b) ステージ2。(c) ステージ3。(d) ステージ4。(e) ステージ5。(f) ステージ6。

7. 結論

本論文では、パラレル構造に基づいて卓球ジャグリングタスク用にカスタマイズされたビジョンベースロボットを開発しました。ハードウェア構成には、2台のカメラを備えた両眼視システム、コンピュータ、およびパラレルロボットが含まれています。タスク要件に合わせた画像処理技術について詳述し、幾何学的方法を使用してジャグリングロボットの逆運動学問題を解き、PD制御に基づいた継続的なジャグリングアルゴリズムを導入しました。システム全体のパフォーマンスを評価するため、2つの実験を実施しました。結果は、プリセットされた高さ値が一定の場合、ロボットのジャグリング高さが目標値に近く調整でき、平均誤差を許容範囲内に保つことができることを示しました。

しかし、異なる高さでのジャグリングパフォーマンスに若干のばらつきが観察されました。設定高さが増加するにつれて、ジャグリング着地位置と最大高さ値および設定閾値の両方間の平均誤差も増加します。これは主に機械誤差、視覚システム誤差、およびその他のハードウェア誤差を含む様々な誤差の蓄積に起因しています。さらに、卓球の物理モデルに関する深い研究は実施していません。そのため、ロボット動力学を統合してロボット制御を改善することが有益である可能性があります。今後の研究では、卓球のボール軌跡を予測するための物理モデルを構築し、着地位置が設定された目標位置に近いままであることを保証するための新しい衝突モデルを開発して、高いロボスタ性を確保します。ジャグリングロボットは複数のサブシステムで構成される複雑なシステムであり、現在の研究成果は限定的です。これら

システムはジャグリング機能以上の目的で研究されています。これらのために開発された制御アルゴリズムは、ドローン、ヒューマノイドロボット、および医療機器を含む他の分野にも適用することができます。さらに、これらのシステムは卓球ロボットシステムにも適用することができ、卓球ロボットシステムのさらなる研究の基礎を築きます。

著者貢献：方法論、Y.J.; ソフトウェア、H.W.; 検証、Y.M.; 形式分析、X.H.; 調査、B.Z.; 執筆—原稿作成、B.Z.; 執筆—レビューと編集、X.H.; 監督、L.Z.; プロジェクト管理、Y.J.およびL.Z.すべての著者は公開版の原稿を読み、同意しています。

資金提供：本研究は外部資金を受けていません。

データ利用可能性ステートメント：データ共有は適用されません。

利益相反：著者は利益相反がないことを宣言します。

参考文献

1. Rapp, H.H. A ping-pong ball catching and juggling robot: A real-time framework for vision guided acting of an industrial robot arm. In Proceedings of the 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications, Wellington, New Zealand, 6-8 December 2011; pp. 430-435.
2. Serra, D.; Ruggiero, F.; Lippiello, V.; Siciliano, B. A nonlinear least squares approach for nonprehensile dual-hand robotic ball juggling. In Proceedings of the 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 9-14 July 2017; pp. 11485-11490.
3. Nakashima, A.; Sugiyama, Y.; Hayakawa, Y. Paddle juggling of one ball by robot manipulator with visual servo. In Proceedings of the 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 5-8 December 2006; pp. 1-6.
4. Müller, M.; Lupashin, S.; D'Andrea, R. Quadrocopter ball juggling. In Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 25-30 September 2011; pp. 5113-5120.
5. Dong, W.; Gu, G.Y.; Ding, Y.; Zhu, X.; Ding, H. Ball juggling with an under-actuated flying robot. In Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 28 September-2 October 2015; pp. 68-73.
6. Poggensee, K.L.; Li, A.H.; Sotsaichich, D.; Zhang, B.; Kotaru, P.; Mueller, M.; Sreenath, K. Ball juggling on the bipedal robot cassie. In Proceedings of the 2020 European Control Conference (ECC), Petersburg, Russia, 12-15 May 2020; pp. 875-880.
7. *IEEE Trans. Robot.* 2320077. Ronsse, R.; Lefevre, P.; Sepulchre, R. Rhythmic feedback control of a blind planar juggler., 790–802. [[CrossRef](#)]
8. Reist, P.; D'Andrea, R. Bouncing an unconstrained ball in three dimensions with a blind juggling robot. In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12-17 May 2009; pp. 1774-1781.
9. *IEEE Trans. Robot.* 2012 289. Reist, P.; D'Andrea, R. Design and analysis of a blind juggling robot., 1228–1243. [[CrossRef](#)]
10. Reist, P.; D'Andrea, R. Design of the pendulum juggler. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 9-13 May 2011; pp. 5154-5159.
11. Fontana, F.; Reist, P.; D'Andrea, R. Control of a swinging juggling robot. In Proceedings of the 2013 European Control Conference (ECC), Zurich, Switzerland, 17-19 July 2013; IEEE: New York, NY, USA, 2013; pp. 2317-2322.
12. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2000, 22, 1330-1334. [[CrossRef](#)]
13. Li, S.; Xu, C.; Xie, M. A robust O(n) solution to the perspective-n-point problem. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2012, 34, 1444-1450. [[CrossRef](#)]
14. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 592010. Zhang, Z.; Xu, D.; Tan, M. Visual measurement and prediction of ball trajectory for table tennis robot. 3195–3205. [[CrossRef](#)]
15. Ji, Y.; Mao, Y.; Suo, F.; Hu, X.; Hou, Y.; Yuan, Y. Opponent hitting behavior prediction and ball location control for a table tennis *Biomimetics* 8 2023 robot., 229. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

免責事項/出版社の注記：すべての出版物に含まれるステートメント、意見およびデータは、個々の著者および寄稿者のものであり、MDPIおよび/または編集者のものではありません。MDPIおよび/または編集者は、コンテンツで言及されているアイデア、方法、指示または製品から生じた人または財産への危害に対する責任を免除します。