単眼視覚移動ロボットによるボール追跡捕獲タスク

高木 史朗*・宮崎 文夫*・森 亮介**

Examination of Ball Tracking and Catching Task using a Monocular Vision-based Mobile Robot

Fumiaki TAKAGI*, Fumio MIYAZAKI* and Ryosuke MORI**

This paper presents an implementation of a ball catching task using a monocular vision-based mobile robot. We have proposed a motion strategy for catching a ball flying in three-dimensional space. This strategy has its roots in the field of experimental psychology but is more powerful and concentrated on a robot. A practical trajectory control law is derived for a non-holonomic mobile robot to track and catch a ball. This control law educes the full potential of the motion strategy: mere a monocular vision-based mobile robot, coping with the problem due to its non-holonomic constraint, successfully catches a ball.

Key Words: ball catching, monocular vision, non-holonomic, mobile robot, visual feedback

1. はじめに

野手はフライをキャッチすべく適切な地点に到達する。この一連の動作は、(1) いかなる情報を取得し、(2) いかに移動することによって実現されているのであろうか。

一般には、両眼視によりボールの3次元位置情報・速度情報を得て、ボールの落下地点を予測し、その場所へ向けて走る、と説明されることが多いが、この説明は以下に述べる理由で妥当でないとされている¹⁾。

(i) ボールが遠くにあると、両眼の視差は0に近づき、精度よくボールの3次元位置情報を得ることができない。(ii) 水晶体調節やボール画像の膨張率などから距離感を得ることも、遠くにあるボールに対しては利用できない。

一方、ヒトは単眼視覚から得られる角度情報を用いてボール捕獲を行なっている、という注目に値する仮説が存在する。この仮説は、物理的な観点からその可能性が示された²⁾。近年では、実験心理学の分野でもこの仮説を部分的に裏付けるような結果が得られており^{3), 4)}、ヒトのホール捕獲において単眼視覚から得られる角度情報が重要であることが認識されつつある^{5)~11)}。

われわれは、視覚フィードバック制御 (visual servoing) のアーキテクチャに基いて、実験心理学の分野で提案された戦略¹⁾を具体化し、ある限定された状況下でボールの捕獲が可能であることを示した¹²⁾。また、実験心理学の分野で

提案された戦略と類似の特徴をもちながら、既存の問題点を改善できるような、よりロボットに特化した形の戦略を提案するとともに、視覚フィードバックのアーキテクチャを用いた移動ロボットの軌道制御手法を導出し、安定解析を通じて捕獲可能領域を明らかにした^{13), 14)}。

しかしながら、これらの結果は、

- (1) ボールの水平速度が無視できるものとする
- (2) 画像ヤコビアンが正確にわかるものとする

の仮定に基づいて得られたものであり、現実的な状況下で機能することが保証された制御手法とはいえなかった。また、視覚フィードバック制御のアーキテクチャに基づいてシステマティックに制御入力を決定するスタイルになっていたため、制御則の意味付けや制御性能を見積もることが困難であった。

そこで本論文では、上記の仮定を取り払っても機能する軌道制御手法を新たに提案する。本手法は、単眼視覚から得られるボールの仰角と水平角のみで追跡方向とスピードを決定するシンプルな非線形フィードバック則として表現される。このため、この制御則によってノンホロノミックな移動ロボットが生成する追跡捕獲軌道を明確に見積もることができる。以下では、提案する制御則の特徴を詳しく説明するとともに、実機による検証実験の結果を示す。

なお提案する制御則には、従来の制御則で用いた画像ヤコビアンが含まれない。一見すると、全く異なる形の制御則に見えるが、その導出のプロセスの中で視覚フィードバック制御のアーキテクチャに基づいた安定解析が役立ったことを記しておく。

* 大阪大学大学院基礎工学研究科 豊中市待兼山町 1-3

** 信州大学工学部 長野市若里 4-17-1

* Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka

** Faculty of Engineering, Shinshu University, Nagano

(Received March 4, 2005)

(Revised August 3, 2005)

Fig. 1 Concept of GAG strategy

Fig. 2 Relative position between the robot and the ball

2. GAG 戦略について

われわれが提案してきた GAG 戦略は、「 $\tan \alpha$ が有限の時間変化率で増加し続けるようにボールを追跡し捕獲する」戦略モデルである¹³⁾。フライボールを追跡捕獲可能であることの直観的説明を与えるため、この戦略に基いてボールを捕獲するようすの概略図を Fig. 1 に示す。この図は、ボールは中央から左方へと投げ上げられ、これをロボットが追跡するようすを模式的に示したものである。ボールを観測したとき、その仰角が一定となる円を EC で示す。端的にいうと、 $\tan \alpha$ が有限の時間変化率で増加するにつれて、この円が小さくなっていき、ボールに接近し、最終的に捕獲にいたる。

3. ボール追跡捕獲タスクのための軌道制御

3.1 移動ロボットの運動モデル

ボール追跡捕獲ロボットの移動機構として、車輪型移動機構を考える。ドリフトせずに走行する車輪型移動機構の運動は、自転車のよう操舵輪をもつものであれ、今回検証実験

に用いる左右独立駆動輪のように方向転換するものであれ、一般に、直進速度 v と回転速度 ω を用いて以下のようにモデル化される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 (x, y) および θ は、ワールド座標系における移動ロボットの位置および姿勢を表わす。

3.2 移動ロボットとボールの相対関係

本節では、前節で述べたような移動ロボットにおいて、ロボットとボールの相対的な関係の時間変化について述べる。

Fig. 2 に示すように、移動ロボットから見て、床面を 0° としたボールの仰角を α 、進行方向を 0° としたボールの水平角を γ とする。これらの変数は、単眼視覚を用いて容易に検出できる。またボールとの水平距離を r とする。もちろん r は単眼視覚では検出できないが、ボールの追跡状況を評価する重要な変数にほかならない。すると、ロボットおよびボールの運動による上記の諸量の時間変化は、

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \gamma & 0 \\ \frac{1}{2r} \sin 2\alpha \cos \gamma & 0 \\ \frac{1}{r} \sin \gamma & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^T \\ \frac{1}{r} l^T \\ \frac{1}{r} n^T \end{bmatrix} w \quad (2)$$

となる。ここで、右辺第 1 項はロボットの動きによる影響を、第 2 項はボールの動きによる影響を表わしており、 e はロボットからボールの真下の点に向かう 3 次元の単位ベクトル、 n は e を水平面内で反時計回りに 90° 回転させたベクトル、 l はロボットからボールに向かう単位ベクトルを鉛直面内で反時計回りに 90° 回転させたベクトル、 w はボールの速度ベクトルを示す。

3.3 制御則

3.1 節で述べたような移動機構に対し、GAG 戦略を実現する制御則として次式を提案する。

$$v = k_1 \cos \gamma \sin 2\alpha \quad (3)$$

$$\omega = k_2 \sin \gamma \sin 2\alpha \quad (4)$$

なお本制御則は、われわれがすでに提案している視覚フィードバック制御則に改良を加え、1 章で述べた 2 つの制約を取り払ったものである。

3.4 追跡に関して

まず、(3)、(4) 式の制御則によりロボットがボールを追跡することを説明する。ここで、追跡とは、仮にボールが空中で静止しているとすれば、移動ロボットがその真下に漸近するように動くことであるとする。ボールとロボットの相対関係を示す (2) 式に制御入力である (3)、(4) 式を代入し、ボール速度項を 0 とすると、 $\dot{r}$ に関して

$$\dot{r} = -k_1 \cos^2 \gamma \sin 2\alpha \leq 0 \quad (5)$$

Fig. 3 Typical paths of the robot subject to Eqs. 3, 4 illustrated every 0.2 sec ($k_1 = 1$, $k_2 = 13$)

が得られ、等号成立は $|\gamma| = \pi/2$ のときに限る。これは、ボールがロボットの真横にあるという状況であるが、このとき、 $\dot{\gamma} = -k_2 \sin \gamma \sin 2\alpha$ となるので、即座にこの状況から脱出する。また、ロボットの直進速度が $v = 0$ となるのは、ロボットがボールの真下に来たときに限る。以上より、ロボットがボールの真下に漸近する、すなわち、ボールを追跡するといえる。

追跡軌道については、その曲率 ρ が、

$$\rho = \frac{\omega}{v} = \frac{k_2}{k_1} \tan \gamma \quad (6)$$

と表わされ、ボールの方位角 γ の正接に比例することがわかる。このことから、移動ロボットは、その初期姿勢、すなわち γ に応じてさまざまな追跡経路をとる。典型的な追跡経路を Fig. 3 に示す。 $\gamma = 0$ のとき、移動ロボットは直進してボールの真下に近づく。 $0 < \gamma \leq \pi/2$ のとき、移動ロボットはボールの方向を向くように回転しながらボールの真下に近づいていく。 $\pi/2 < \gamma \leq \pi$ のとき、ロボットは後ろ向きに進みながらも、ボールの方向を向くように姿勢を調整し、 $\gamma < \pi/2$ になると、前進を始め、ボールの真下に近づいていく。 γ の符号が負のときも、回転方向が逆になるだけで同様である。

ところで、上記の追跡において、仰角の正接 $\tan \alpha$ の時間変化は、

$$\frac{d}{dt} \tan \alpha = \frac{k_1 h}{r^2} \cos^2 \gamma \sin 2\alpha \quad (7)$$

と表わされる。ただし、 h はボールの高さを意味する。したがって、 $|\gamma| = \pi/2$ の場合を除き、 $\tan \alpha$ は増加し続ける。 ($|\gamma| = \pi/2$ の場合は、以上に述べたように瞬時に $|\gamma| < \pi/2$ に遷移する。) すなわち、GAG 戦略を示した Fig. 1 のように仰角が一定となる円 EC が次第に小さくなっていき、ボールの真下に漸近することがわかる。

Fig. 4 Path of the robot pursuing a ball

Fig. 5 Change in the distance to the ball

3.5 捕獲に関して

3.5.1 ボール水平速度がない場合

まず、ボールを鉛直上方に投げ上げ、重力落下によって落下する場合を考える。この場合も (5) 式が成り立つことから、この制御則にしたがって動く移動ロボットのボール追跡経路は、ボールの高さによらず、初期のボールの距離 r とボールの方位角 γ によって一意に決まる。したがって、前節と同様の議論によって、移動ロボットはボールの真下に漸近し、やがて落下してくるボールを捕獲することができる。また、移動ロボットのゲインの比 k_1/k_2 を保ったままゲインをあげると、追跡経路を変えることなく、ボールの真下に接近する速さを上げることができるので、十分大きなゲインを用いることによりボールの落下時刻に間に合うようにすることができる。

3.5.2 ボール水平速度がある場合

つぎに、投げ上げられたボールに対して、その水平速度を考慮に入れた上で、捕獲可能であることを説明する。ボールとロボットの相対関係を示す (2) 式に制御入力である (3), (4) 式を代入すると、

$$\dot{r} = -k_1 \cos^2 \gamma \sin 2\alpha + \mathbf{e}^T \mathbf{w} \quad (8)$$

が得られる。 $\mathbf{e}^T \mathbf{w} \leq 0$ の間 (ボールが移動ロボットに向かって飛んでくる状況) は、前節と同様の議論により、ロボット

はボールの真下に近づき、落ちてくるボールを捕獲できることとなる。つぎに、 $e^T w > 0$ のときを考える。このとき、ボールを後ろから追いかける状況となる。この後、 $\gamma \simeq 0$ になったとすると、 r の時間変化は、(8) 式より、

$$\dot{r} = -k_1 \sin 2\alpha + \|w\| \quad (9)$$

となる。ここで、 $\sin 2\alpha = 2hr/(h^2 + r^2)$ の関係が成り立つことから、 k_1 が $\|w\|$ に比べて十分大きければ、ロボットとボールの水平距離は

$$r_p = \frac{h\|w\|}{2k_1} \quad (10)$$

に漸近する^(注1)。すなわち、ロボットは(10)式に従ってボールに接近し、ボール着地時 ($h = 0$) にボールを捕獲することとなる。

ところで、(2) 式と (3), (4) 式より、

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{r} k_1 \sin \gamma \cos \gamma \sin 2\alpha - k_2 \sin \gamma \sin 2\alpha + \frac{1}{r} n^T w \quad (11)$$

であり、右辺第1, 2項に着目すれば、

$$-k_2 + \frac{k_1}{r} \cos \gamma < 0 \quad (12)$$

となるときに、特殊な状況 ($\gamma = \pi$) を除いて(11)式の右辺第1, 2項は負となる。これから、

$$\frac{k_2}{k_1} > \frac{1}{r} \quad (13)$$

が満たされるとき、(11) 式は

$$\dot{\gamma} < -\frac{k_1}{r} (1 - \cos \gamma) \sin \gamma \sin 2\alpha + \frac{1}{r} n^T w \quad (14)$$

となるから、 k_1 が $\|w\|$ に比べて十分大きければ、 $|\gamma|$ を小さく保つことができる。

以上、条件(13)式およびロボットとボールの水平距離が漸近する値 r_p を示す(10)式をまとめると、

$$\frac{k_2}{k_1} > \frac{1}{r_p} \quad (15)$$

を満たす十分大きなゲイン k_1, k_2 を用いれば、ボールとロボットの水平距離 r は、およそ

$$r_p = \frac{h\|w\|}{2k_1} \quad (16)$$

に近づく。

以上の説明を検証するために、水平速度を与えて投げ上げたボールを追跡捕獲するシミュレーションを行なった。結果を Fig. 4 に示す。ボールは、 $(x, y, z) = (0, 0.3, 0)$ [m] の地点から投げ上げられ、1秒後に $(x, y, z) = (0, -0.1, 0)$ [m] の地点に落ちる。4つの異なる地点から出発するロボットについて、(3), (4) 式 (ただし、 $k_1 = 3, k_2 = 39$) に基づいてシミュレーションを行なった。初期条件として、初期位置はそ

(注1) 正確には、 $\frac{k_2}{k_1} > \frac{1}{r_p}$ を満たすとき (下記成立の十分条件)

$$r_p = \begin{cases} 0 & (\|w\| = 0 \text{ のとき}) \\ \frac{k_1 - \sqrt{k_1^2 - \|w\|^2}}{\|w\|} h & (0 < \|w\| < k_1 \text{ のとき}) \\ \text{存在しない} & (\|w\| \geq k_1 \text{ のとき}) \end{cases}$$

であり、 $k_1 \gg \|w\|$ をとると、本文中の式のように近似できる。

Fig. 6 Path of the robot pursuing a ball

れぞれ、 $(x, y) = (0.4, 0), (0, 0.4), (-0.4, 0), (0, -0.4)$ であり、初期姿勢はすべて x 軸正の向きである。また、 $(-0.4, 0)$ から出発するロボットについて、ボールとロボットの水平距離の変化を Fig. 5 に示す。この図から、破線で示される(16)式の値に追従するようにしてボールとの水平距離が減少し、捕獲に至ることがわかる。

4. ボール追跡捕獲タスクの実験的検証

これまでに述べてきた事項を実際に確認するため、実機を用いて検証実験を行なった。使用した実機の構成を以下に示す。移動ベースとして左右独立駆動方式の移動機構を用い、これに魚眼レンズ付き IEEE1394 カメラを搭載した。移動ベースのサイズと性能については、全長 300[mm]、全幅 300[mm] であり、直進時の最高速度は 2.0[m/sec]、最高加速度は 1.8[m/s²] である。カメラからはビデオレートである 33[msec] ごとに画像が得られ、ボールの重心位置を求め、魚眼レンズの構成式よりボールの仰角 α と水平角 γ を求め、(3), (4) 式から必要な直進速度および角速度を求め、移動ロボットの左右の車輪速度を計算する。計算された左右の車輪速度は RS-232C 通信ケーブルを介して移動ベースに伝えられ、移動ベースのサーボコントローラにより左右の車輪を駆動するモータが制御される。

4.1 空中で静止するボールに対して

4.1.1 実験条件

本論文で提案する制御則は、移動ロボットのノンホロノミック性を考慮したものとなっている。その特徴がもっとも現れるのは、ボールがロボットの後方にあるときであり、ロボットはまず後退した後前進を始め、ボールの真下に近づいていく。このような挙動を確認するために、ロボットの車体中心から後方に 45cm、左方に 10cm、高さ 100cm の位置にボールを固定し、このボールを追跡させた。なおゲインの設定値は、Fig. 3 に示したシミュレーション結果を得たときの値と同様の $k_1 = 1, k_2 = 13$ を与えた。

4.1.2 実験結果

上記の実験条件のもとで行なったボール追跡捕獲動作のようすを Photo. 1 と Fig. 6 に示す。いずれも斜め上方から表示および撮影したものとなっている。Photo. 1 は、撮影し

Photo.1 Ball catching by a wheeled mobile robot with monocular vision system

たビデオから 0.33 秒ごとにボールとロボットを抜き出した連続写真である。Fig. 6 は、このときのロボットの追跡経路とボールの位置をプロットしたものである。実験が開始されてしばらくは後退を続け、その後前進しながらボールの真下に到達する Fig. 3 と同様の追跡経路が実現されていることが確認できる。

4.2 空中に投げ上げられたボールに対して

4.2.1 実験条件

ボールが水平速度をもつ場合もボールの追跡捕獲が可能であることをシミュレーション結果 (Fig. 4) として示したが、このことを実験的に裏付けるために、つぎのような手順で実験を行なった。まず、ヒトあるいはボール射出装置によってボールを投げ上げる。移動ロボットに搭載したカメラでボールの画像が得られた時点で、ボール捕獲動作に入る。ビデオレート 33[msec] ごとに画像が更新され、ロボットとボールの相対関係から時々刻々とロボットに速度指令が与えられ、ボールの捕獲位置まで移動する。(ボールがカメラから見えなくなると、目標速度をゼロに設定する。)

なお、魚眼レンズがボールの像を捕えることのできるボール高さは 1.5[m] 以下であること、移動ロボットの最大加速度が $1.8[\text{m/s}^2]$ であることを考慮し、ロボットの車体中心か

Photo.2 Ball catching by a wheeled mobile robot with monocular vision system

Fig. 7 Path of the robot pursuing a ball

ら前方に約 50[cm]、右方に約 20[cm] の位置からボールを投げ上げ、Fig. 4 に示したシミュレーション結果を得たときとほぼ同様のボール軌道を与えた。また、ゲインの設定値として、Fig. 4 に対応した $k_1 = 3, k_2 = 39$ を与えた。

4.2.2 実験結果

上記の実験条件のもとで行なったボール追跡捕獲動作のようすを Photo. 2 と Fig. 7 に示す。Photo. 2 は、撮影したビデオから 0.1 秒ごとにボールとロボットを抜き出した連続写真である。Fig. 7 は、このときのロボットの追跡経路とボールの軌道をプロットしたものである。ボールの像がカメラの視野内に入った瞬間に追跡を開始し、Fig. 4 と同様の追跡経路をたどりながらボール捕獲に至っていることが確認できる。

5. おわりに

本論文では、ノンホロノミックな移動ロボットによってボールを追跡捕獲するタスクを実現する方法の 1 つを示し

た。すなわち、3次元空間を飛行するボールを単眼視覚のみによって捕獲することを意図したGAG戦略を具体化する制御則を提案した。また、実機を用いた検証実験により、その有効性を確認した。単眼視覚から得られるボールの仰角と水平角に基づく非線形フィードバック則として具体化した提案手法は、シンプルであるにもかかわらず、ボールに対する移動ロボットの相対姿勢に応じて追跡経路のパターンが大きく変化する非線形的な挙動を示す。また、空気抵抗や風の影響を受けても、原理的にはボールの追跡捕獲が可能である。ただし、提案手法でボールを確実に捕獲するには、ボールの水平速度より速く走る必要がある。

本論文で提案した手法は、ボールを追跡捕獲するタスクを念頭に置いて導出したものであるが、軌道上のターゲット衛星への接近問題に適用することも可能と考えられる。この場合、空中で静止しているボールをターゲット衛星、移動ロボットをターゲット衛星に接近しようとするチェイサ衛星と見なすことになる。この接近問題への適用結果については、別の機会に紹介したい。

参 考 文 献

- 1) M. K. McBeath, D. M. Shaffer and M. K. Kaiser: How Baseball Outfielders Determine Where to Run to Catch Fly Balls, *Science*, **268**, 569/573 (1995)
- 2) S. Chapman: Catching a Baseball, *American Journal of Physics*, **36**, 868/870 (1968)
- 3) P. McLeod and Z. Dienes: Running to Catch the Ball, *Nature*, **362**, p.23 (1993)
- 4) P. McLeod, N. Reed and Z. Dienes: How fielders arrive in time to catch the ball, *Nature*, **426**, 244/243 (2003)
- 5) A. Suluh, T. Sugar and M. McBeath: Spatial Navigational Principles: Appications to Mobile Robotics,
- 6) M. McBeath, T. Sugar and D. Shaffer: Comparison of Active versus Passive Ball Catching Control Algorithms Using Robotic Simulations, In *Vision Science Conference* (2001)
- 7) K. Mundhara, A. Suluh, T. Sugar and M. McBeath: Intercepting a Falling Object: Digital Video Robot, In *Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002)*, 2060/2065 (2002)
- 8) A. Suluh, K. Mundhara, T. Sugar and M. McBeath: Spatial Interception for Mobile Robots, In *Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2002)*, 4263/4268 (2002)
- 9) E. Aboufadel: A mathematician catches a baseball, *American Mathematical Monthly*, **103**, 870/878 (1996)
- 10) R. S. Marken: Controlled variables: Psychology as the center fielder views it, *The American Journal of Psychology*, **114-2**, 259/281
- 11) J. A. Borgstadt and N. J. Ferrier: Interception of a Projectile Using a Human Vision-Based Strategy, In *Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2000)* (2000)
- 12) 森, 宮崎: 自律移動ロボットを介したヒトのボール捕獲戦略の検討, 計測自動制御学会論文集, **38-6**, 543/548 (2002)
- 13) 森, 宮崎: ボール追跡捕獲タスクに対するGAG (Gaining Angle of Gaze) 戦略, 計測自動制御学会論文集, **39-4**, 388/393 (2003)
- 14) Fumio Miyazaki and Ryosuke Mori: Realization of Ball catching task using a Mobile Robot, proceedings 2004

IEEE International Conference on Networking Sensing and Control, 58/63 (Taipei, Taiwan, 2004.3.22)

[著 者 紹 介]

高 木 史 朗

2004年大阪大学基礎工学部卒業。現在、大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻博士前期課程在学中。日本ロボット学会学生会員。

宮 崎 文 夫 (正会員)

1979年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士課程中途退学。同年大阪大学基礎工学部助手。86年同助教授。91年同教授となり、現在に至る。この間87~88年米国カリフォルニア大学客員准教授。95~98年宇宙科学研究所(現JAXA)客員教授。ロボットの知能化に関する研究に従事(工学博士)。日本ロボット学会、システム制御情報学会、IEEE各会員。

森 亮 介

1996年大阪府立大学工学部機械工学科卒業。98年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2003年大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻博士後期課程修了。同年東京大学大学院情報理工学系研究科学術研究支援員。2004年東北大学大学院情報科学研究科助手。2005年信州大学工学部助手となり、現在に至る。移動ロボットに関する研究に従事。日本ロボット学会会員。