

طراحی، روایی و پایایی سنجی نرم افزار محاسبه کننده کینماتیک حرکت، با استفاده از پردازش تصویر

سروش باقری کودکانی^{۱*}، شهرام لنجان نژادیان^۲، مصطفی حاج لطفعلیان^۳

۱- کارشناس ارشد بیومکانیک ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان.

۲- استادیار بیومکانیک ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه اصفهان.

۳- دانشجوی دکتری بیومکانیک ورزشی، دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۷/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۹/۱

چکیده

نرم افزارهای تحلیل حرکت، ابزاری سودمند و پرکاربرد در بررسی بیومکانیکی حرکتها هستند، اما به دلیل بالای بودن قیمت این ابزار، محققان اندکی امکان استفاده از آنها را دارند. هدف این مطالعه، طراحی و اعتباریابی نرم افزاری کاربردی و ارزان قیمت برای محاسبه کینماتیک حرکت است. در طراحی این نرم افزار از الگوریتم های دقیق پردازش تصویر و روش انتقال مستقیم خطی (DLT)^۱ برای تعیین موقعیت مارکرها در تصاویر و فضا استفاده شد. برای سنجش اعتبار نرم افزار، آزمایش های متعددی در وضعیت های ایستا، پویا، خطی و زاویه ای در فضای دوبعدی و سه بعدی با ابزار مناسب انجام گرفت و با نتایج حاصل از نرم افزار به وسیله آزمون یومن ویتنی مقایسه شد و اختلاف معنی داری مشاهده نشد. برای بررسی روایی و پایایی نرم افزار، از ضریب همبستگی پیرسون و ضریب همبستگی درونی استفاده شد که در کلیه مقایسه های انجام شده، مقادیر بزرگتر از ۰/۹۷ برای این دو ضریب به دست آمد که نشان دهنده روایی و پایایی زیاد نرم افزار است. با توجه به نتایج تحقیق نرم افزار حاضر، با قابلیت هایی مانند یافتن خودکار موقعیت مارکرها در تصاویر حاصل از دوربین های ویدئویی، ارزانی قیمت، امکان استفاده در فضای باز و پردازش تصاویر دوبعدی و سه بعدی، می تواند ابزار مناسبی برای تحلیل کینماتیک حرکت باشد.

کلیدواژه ها: نرم افزار، تحلیل حرکت، کینماتیک، پردازش تصویر.

Designing, validation, and reliability assessment of software to acquire kinematics parameters of motion by image processing

Bagheri Kudakani, S¹., Lenjannejadian, Sh²., Hajlotfalian, M³.

1- Master of Science Sport Biomechanic, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Isfahan University, Iran.

2- Assistant Professor Sport Biomechanic, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Isfahan University, Iran.

3- PhD Student Sport Biomechanic, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, Kharazmi University, Iran.

Abstract

Motion analysis systems are useful and effective equipment in biomechanics research. Unfortunately these systems are available for few researchers because these are expensive equipment. The aim of this study was to design and validation of a practical and inexpensive software, to determine the exact markers position in space and compute the kinematic of movement. In designing the software, the exact image processing algorithms and Direct Liner Transformation (DLT) method were used to calculate markers position in space. To validate the software, the markers position in static, dynamic, linear, angular, 2D and 3D conditions were calculated by other standard tools and compared with software outputs using Mann-Whitney U test and no significant difference were observed. The validity and reliability of the software was assessed using Pearson Correlation Coefficient and Intraclass Correlations Coefficient and during all test conditions, very high levels of these coefficients were found (≥ 0.97). In a nutshell, present software, with features such as automatic tracking markers, inexpensive price, the possibility to outdoor use and image processing in 2D and 3D conditions, is valid and reliable software for kinematics analysis.

Keywords: Software, Motion Analysis, Kinematic, Image Processing.

*. Soroosh.b.k@gmail.com

1. Direct Liner Transformation

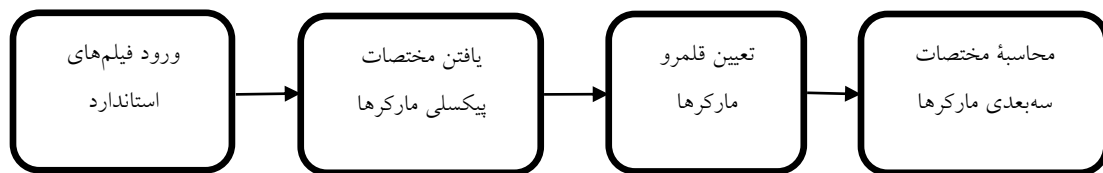
مقدمه

تولید علم و کشف حقایق جدید در بسیاری از حیطه‌ها، نیازمند ابزار مناسب و دقیق برای اندازه‌گیری است. امروزه بررسی و شناخت دقیق حرکات انسان در تحلیل راه‌رفتن، تحلیل حالت پاسجر، ارتوپدی جهت بررسی پروتزهای جایگزین، فیزیوتراپی مفاصل آسیب‌دیده و تحلیل حرکات ورزشی، ضروری است (۳-۱). محاسبه کینماتیک به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد. گونیامتر و شتاب‌سنج دو مورد از مهم‌ترین ابزارهای هستند که برخی پارامترهای کینماتیک حرکت را به‌طور مستقیم محاسبه می‌کنند. پرتابل بودن، قابلیت انتقال سریع اطلاعات به رایانه و قیمت نه‌چندان زیاد این وسایل، از جمله مزایای آنها به‌شمار می‌رود (۴). البته وجود معایبی همچون ناتوانی در محاسبه زوایای مطلق در گونیامتر و زمان‌بر بودن فرایند نصب و ایجاد محدودیت حرکتی برای کاربر، استفاده از این وسایل را با محدودیت‌هایی همراه کرده است (۴). در سالیان اخیر، نسخه‌هایی از حسگرهای اینرسی-مغناطیسی ارائه شد که بدون نیاز به دوربین، پارامترهای کینماتیکی را اندازه‌گیری می‌کند (۷-۵). مشکل اصلی این دستگاه‌ها، ایجاد محدودیت حرکتی برای کاربر بود که استفاده از حسگرهای اینرسی-مغناطیسی بی‌سیم توانست این مشکل را به نوعی رفع کند و در مطالعات بسیاری استفاده شود (۱۰-۸). گفتنی است الگوسازی حرکت انسان (۱۱) و استفاده از دستگاه‌هایی که نیازی به مارکر نداشتند (۱۲)، روش‌های دیگری برای تحلیل حرکت بودند که البته هرکدام با محدودیت‌هایی همراه بود. امروزه، متداول‌ترین روش برای محاسبه کینماتیک حرکت، استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری و الگوریتم‌های پردازش تصویر است. دقت مطلوب، قابلیت پردازش در لحظه و ایجاد نکردن محدودیت حرکتی برای کاربر توسط مارکرها، از جمله مزایای این دستگاه‌هاست (۱۳). بیشتر این دستگاه‌ها از دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری شامل دوربین و نرم‌افزار پردازش تصویر تشکیل شده‌اند. دو قابلیت مهمی که در بخش سخت‌افزاری این دستگاه‌ها وجود دارد، سرعت و تعداد دوربین‌ها است که می‌تواند منجر به محو و پنهان شدن مارکرها شود. عامل نرم‌افزاری که می‌تواند خطا را افزایش دهد، عدم دقت کافی الگوریتم‌های پردازش تصویر در تعیین موقعیت مارکرها در فضا است که استفاده از الگوریتم‌های دقیق‌تر و افزایش تعداد دوربین‌ها می‌تواند احتمال بروز این خطاها را کاهش دهد. در سالیان اخیر، محققان زیادی با استفاده از مارکرها بازنمایی و دوربین‌های مادون قرمز، سعی در کاهش این خطا داشتند (۱۶-۱۴). امروزه دستگاه‌های اپتوالکترونیک که برپایه مارکر و ویدیو ساخته می‌شوند، در محاسبه سه‌بعدی کینماتیک حرکت به‌فوق مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲). با وجود قابلیت‌های بسیار زیاد این دستگاه‌ها، امکان استفاده از این ابزار، در فضای باز با محدودیت‌هایی همراه است و قیمت بسیار زیاد این وسایل، امکان استفاده از آن را به‌تمامی محققان نمی‌دهد. به‌علاوه، دشواری فرایند راه‌اندازی و به‌کارگیری، از دیگر معایب این دستگاه‌ها است (۱۴).

با این اوصاف، این نیاز وجود دارد که ابزاری طراحی شود تا بدون این محدودیت‌ها، کینماتیک حرکت را به صورت سه بعدی و با خطای کم اندازه‌گیری کند. رویکرد این مطالعه، طراحی نرم‌افزاری کم‌هزینه با امکان آزمون در فضای باز و قابلیت همراه شدن با دوربین‌های ویدیویی با سرعت‌های مختلف، برای تعیین موقعیت دقیق مارکرها به صورت اتوماتیک و محاسبه کینماتیک حرکت است. در این مطالعه، علاوه بر تشریح عملکرد نرم‌افزار، دقت داده‌های خروجی، روایی و پایایی آن نیز بررسی خواهد شد.

روش‌شناسی

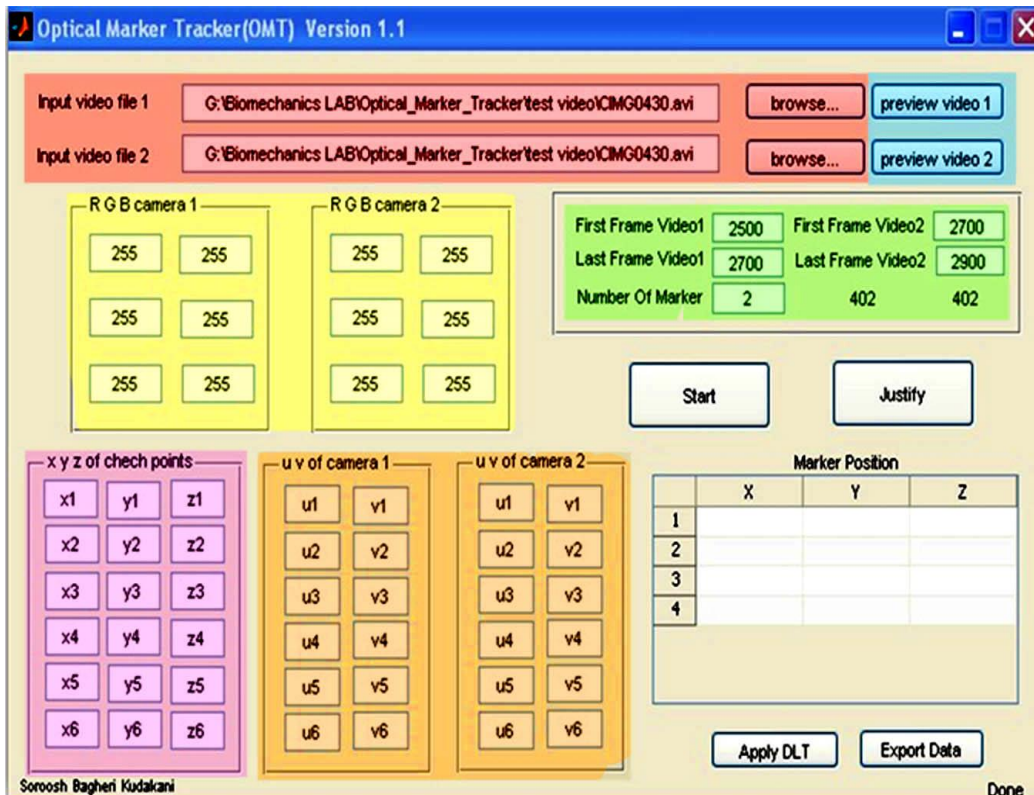
معرفی نرم‌افزار: از آنجایی که عملکرد نرم‌افزار حاضر بر پایه جست‌وجوی پیکسل‌های تصویر و در نهایت مارکرها بود، Marker Tracker یا به اختصار MT نام‌گذاری شد. این نرم‌افزار فیلم‌هایی با پسوند AVI را به عنوان ورودی دریافت، و موقعیت دوبعدی و سه بعدی مارکرها را بسته به نیاز کاربر ارائه می‌دهد. کلیات فرایندی که برای ردیابی دقیق مارکرها در نرم‌افزار MT لازم است، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در ادامه، چگونگی طراحی، ساخت، اعتبار و پایایی سنجی نرم‌افزار MT بیان خواهد شد.



شکل ۱. فرایند محاسبه موقعیت مارکر در نرم‌افزار MT

پروتکل تصویربرداری و هم‌زمان‌سازی دوربین‌ها: در نرم‌افزار MT برای کاهش خطا در تحلیل حرکات، بسته به دوبعدی یا سه بعدی بودن حرکت، بایست طریقه گرفتن فیلم و موقعیت قرارگیری دوربین یا دوربین‌ها به درستی تنظیم شود. بدین منظور، در تصویربرداری دوبعدی برای اطمینان از عمود بودن محور دوربین بر صفحه حرکت، از یک گونیا که در صفحه حرکت تعبیه شده بود و در میدان دید دوربین قرار داشت، استفاده شد. همچنین برای کاهش خطای پرسپکتیو، تا حد امکان دوربین به عقب برده شد و از بزرگ‌نمایی اپتیکال استفاده شد. در تصویربرداری سه بعدی، از پروتکل انتقال مستقیم خطی استفاده شد. لازمه انجام تحلیل سه بعدی، استفاده از حداقل دو دوربین و هم‌زمان‌کردن آنها با یکدیگر است. در مطالعه حاضر دو دوربین به کار گرفته شد که زاویه محورهای اپتیکی آنها با یکدیگر ۹۰ درجه بود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دو ورودی فیلم که هر کدام مربوط به یک دوربین است، در نرم‌افزار تعبیه شد که در تحلیل سه بعدی به کار رفت. برای فرایند هم‌زمان‌سازی، کلیه قاب‌های ضبط شده توسط هر یک از دوربین‌های ویدیویی را شماره‌گذاری می‌کرد و هم‌زمان

با پخش فیلم، شماره قاب را نیز به نمایش می‌گذاشت. در ادامه، کاربر پس از دیدن فیلم‌های بارگذاری شده در نرم‌افزار (شکل ۲، کادر آبی)، شماره قاب‌های ابتدایی و انتهایی مورد نظر خود را در دو دوربین پیدا و در قسمت مربوط وارد می‌کرد تا وارد معادلات DLT شود (شکل ۲، کادر سبز).



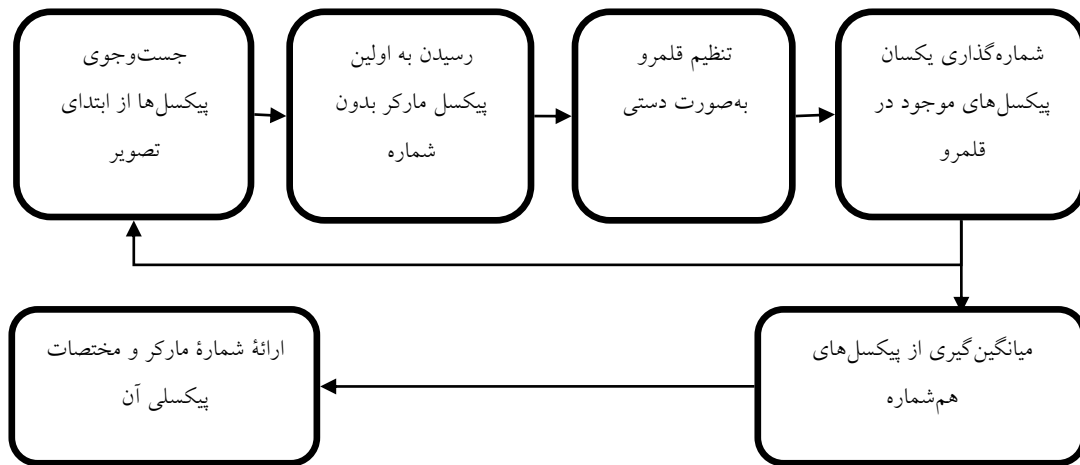
شکل ۲. صفحه رابط کاربر؛ ورودی فیلم‌ها (کادر قرمز)؛ نمایش فیلم‌ها (کادر آبی)؛ هم‌زمان کردن قاب‌های دو دوربین (کادر سبز)

یافتن مختصات پیکسلی مارکرها: تصویر تعدادی پیکسل دارد که رنگ هر پیکسل از سه مقدار که معرف RGB است، تشکیل شده است. یکی از راه‌های پیدا کردن موقعیت شیء در تصویر، جست‌وجوی رنگ آن در تصویر است و در طراحی نرم‌افزار حاضر نیز از این شیوه استفاده شد. بنابراین، برای استفاده از MT، بایست مارکرهایی انتخاب شوند که دارای رنگی متمایز با دیگر قسمت‌های تصویر باشند. گفتنی است رنگ شیء به میزان نوری که بازتاب می‌کند بستگی دارد؛ بنابراین، مارکرهایی که به بدن متصل می‌شوند در حین حرکت، ممکن است دچار تغییر رنگ شوند. برای حل این مشکل می‌توان تا حدودی از ابزار نورپردازی جهت کنترل نور محیط بهره برد. در نرم‌افزار MT، به منظور کاهش خطا در تعیین موقعیت مارکرها، محلی برای انتخاب طیفی از رنگ‌ها با تنظیم دامنه مد RGB قرار داده شد (شکل ۲، کادر زرد). به عبارتی، اگر مارکرها متصل شده به آزمودنی

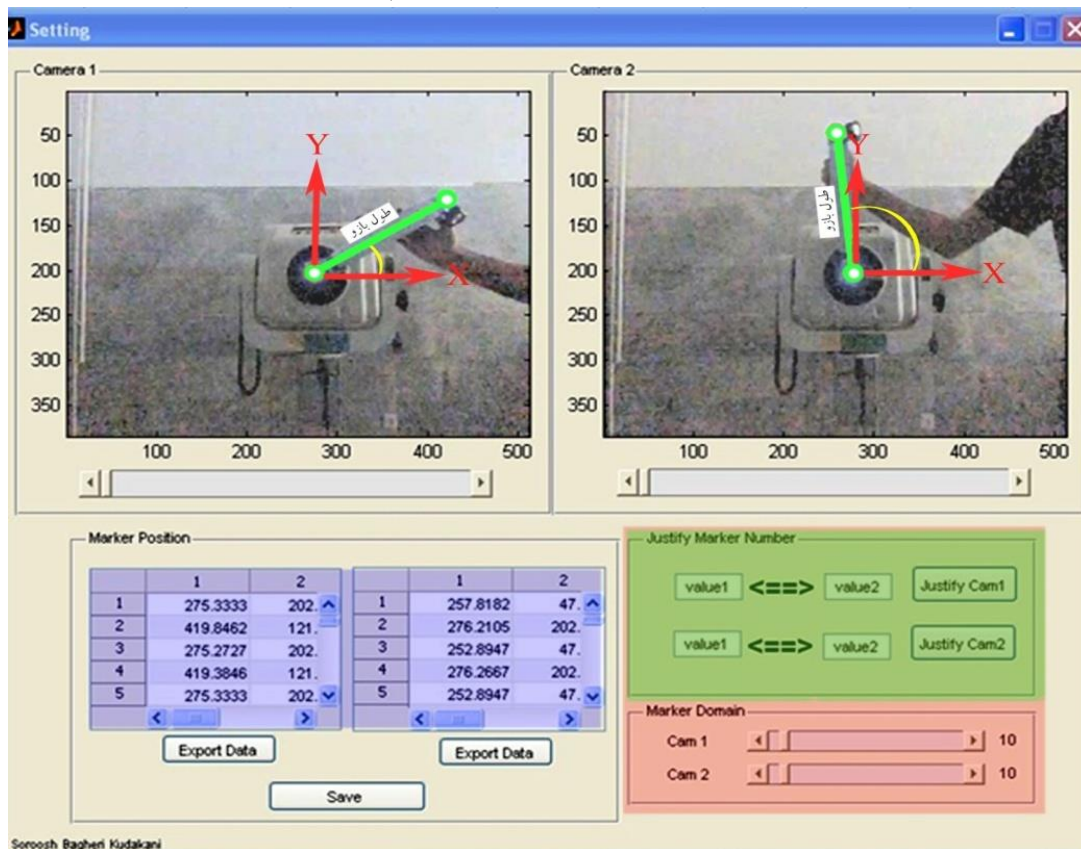
۱. RGB کوتاه‌شده سه رنگ اصلی قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) است که هرکدام دامنه‌ای از صفر تا ۲۵۵ دارند و تمام رنگ‌ها از ادغام این سه رنگ به وجود می‌آیند. دو طرف این طیف، رنگ‌های مشکی با RGB (۰ ۰ ۰) و رنگ سفید با RGB (۲۵۵ ۲۵۵ ۲۵۵) می‌باشد.

سفیدرنگ باشند، با اینکه که مقدار RGB درحالت عادی (۲۵۵ ۲۵۵ ۲۵۵) است، ممکن است در تصویر ضبط شده RGB برخی از مارکرها، مقداری تغییر کند؛ بنابراین، این امکان به کاربر داده شده است تا مقدار RGB را به صورت دامنه مشخص کند. یعنی برای هر یک از سه رنگ اصلی تشکیل دهنده RGB، به جای یک عدد ثابت، بسته به میزان تغییر رنگی که در مارکرها ایجاد شده است، یک دامنه از اعداد مشخص کند تا تمامی مارکرها در تصویر شناسایی و یافت شوند.

تعیین قلمرو مارکرها: به طور کلی، هر قاب یا تصویر دارای تعدادی پیکسل است و بسته به میزان کیفیت، سرعت و بزرگ‌نمایی استفاده شده در فرایند تصویربرداری، هر مارکر از تعداد متفاوتی پیکسل که هر کدام مختصات پیکسلی (x y) خاصی دارند، تشکیل شده است. جهت اختصاص یک مختصات واحد به مارکری که از چندین پیکسل تشکیل شده است، ابتدا بایست قلمرو مارکرها تعیین شود. این فرایند، زمانی که مارکرها فاصله کمی با یکدیگر داشته باشند یا به علت زیادبودن بسامد حرکت، کمبودن فرکانس نمونه‌برداری و بروز کشیدگی در مارکرها، به صورت دستی و توسط کاربر به راحتی تنظیم می‌شود و در غیر این صورت نرم‌افزار قلمرو را بسته به اندازه مارکرها در تصویر به صورت خودکار مشخص می‌کند. فرایند تعیین قلمرو مارکرها به این صورت است که نرم‌افزار، قاب مورد نظر را از پیکسل ابتدایی (پیکسل با مختصات (۱ ۱)) تا پیکسل انتهایی، که مختصات آن بسته به کیفیت تصویربرداری ممکن است متفاوت باشد، مورد جست‌وجو کند. درحین فرایند جست‌وجو، به محض رسیدن به اولین پیکسلی که دارای RGB تعیین شده برای مارکرها است (قبلاً محقق در کادر زرد شکل ۲ وارد کرده است)، نرم‌افزار مختصات پیکسلی آن را ثبت می‌کند. سپس، این پیکسل مرکز دایره‌ای را تشکیل می‌دهد که شعاع آن به صورت دستی و به دست کاربر برحسب تعداد پیکسل تنظیم می‌شود (کادر قرمز، شکل ۴). در صورت مناسب بودن نسبت فرکانس نمونه‌برداری به فرکانس حرکت، این شعاع اندک و در غیراین صورت زیادتر تنظیم می‌شود. در ادامه هر یک از پیکسل‌های موجود در شعاع مربوط (قلمرو هر مارکر)، با شماره واحد و یکسانی شماره‌گذاری می‌شود. به عبارتی، پیکسل‌های مارکر ۱، شماره ۱ را به خود اختصاص می‌دهند. در ادامه، نرم‌افزار دوباره شروع به جست‌وجوی پیکسل‌ها می‌کند تا بار دیگر به اولین پیکسلی که دارای RGB مورد نظر باشد و قبلاً نیز شماره‌گذاری نشده باشد برسد. این فرایند تا جست‌وجوی پیکسل انتهایی تصویر و یافتن آخرین مارکر ادامه می‌یابد. در نهایت، از مختصات پیکسل‌های هم‌شماره که در یک قلمرو قرار دارند، به طور جداگانه میانگین‌گیری می‌شود و مقدار به دست آمده مختصات مارکر مورد نظر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳. نمودار چگونگی تعیین قلمرو مارکرها در نرم افزار MT



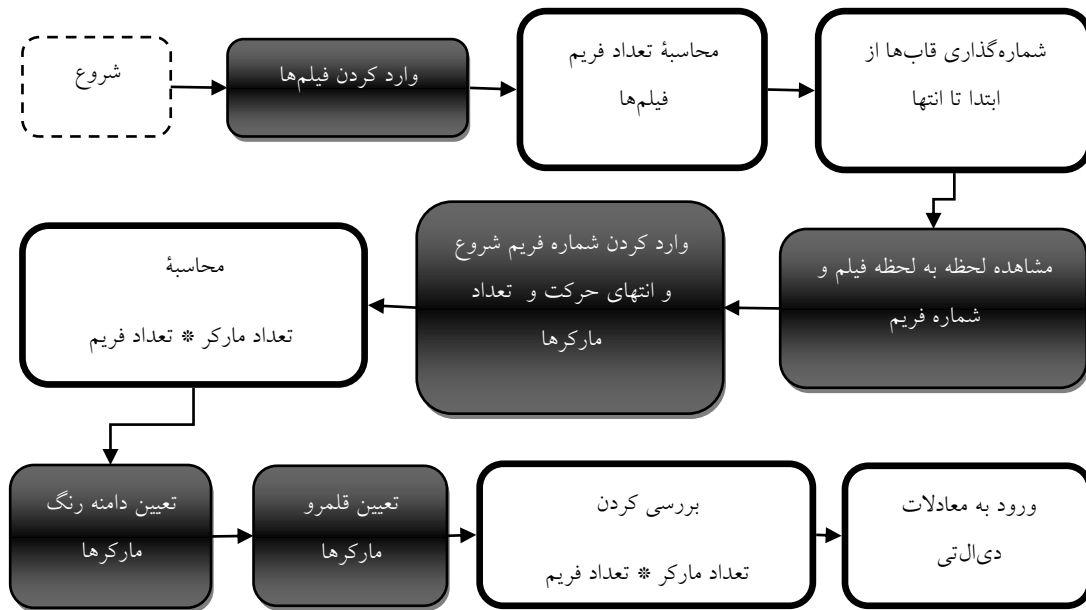
شکل ۴. تنظیمات نرم افزار و نمایش مارکرهای تشخیص داده شده و موقعیت آنها

محاسبه مختصات سه بعدی مارکرها: در MT برای محاسبه موقعیت مارکرها در فضای سه بعدی از روش DLT استفاده شد. در این روش، دست کم دو دوربین لازم است. ابتدا برای کالیبره کردن فضا، باید ضرایب $C_1 \dots C_{11}$ در رابطه ۱ محاسبه شود (۱۷).

$$U + C_1X + C_2Y + C_3Z + C_4 + C_9UX + C_{10}UY + C_{11}UZ = 0 \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$V + C_5X + C_6Y + C_7Z + C_8 + C_9VX + C_{10}VY + C_{11}VZ = 0$$

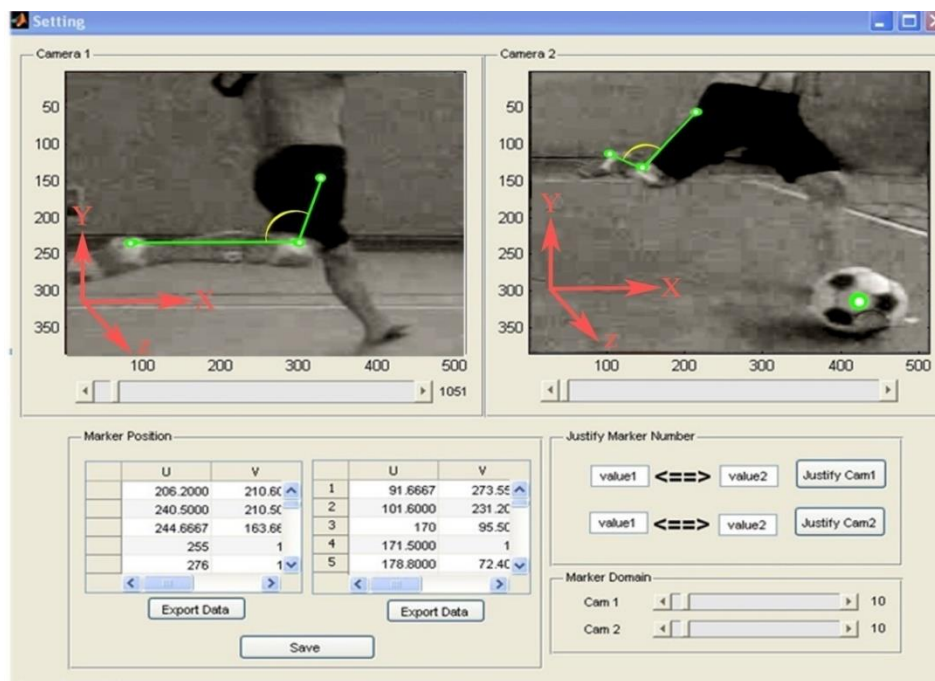
در ابتدا، برای محاسبه ضرایب، باید حداقل موقعیت شش نقطه در فضا (Z, Y, X) مشخص شود و سپس موقعیت این شش نقطه در تصاویر، برحسب پیکسل (V, U) نیز به دست آید و در رابطه ۱ قرار گیرد. در این رابطه، U و V مختصات نقاط مورد نظر برحسب پیکسل است که مقدار U متعلق به محور افقی و مقدار V نیز متعلق به محور عمودی است. همچنین، مقادیر X, Y و Z معرف مختصات نقاط مورد نظر در فضا است (شکل ۱، کادر بنفش). سپس، طبق رابطه ۱، برای هر دوربین دوازده معادله و یازده مجهول به دست آمد. برای حل این دستگاه معادلات و محاسبه مجهولات از روش **Least-Squares** استفاده شد (۹). سپس، با داشتن ضرایب معادلات (شکل ۱، کادر نارنجی)، موقعیت هر نقطه در فضای کالیبره، تنها با استخراج موقعیت آن نقطه از تصاویر محاسبه شد. در این حالت، برای هر نقطه در هر دوربین، دو معادله تشکیل شد؛ بنابراین یک دستگاه با چهار معادله و سه مجهول به دست آمد. در این نرم افزار، با وارد کردن اطلاعات لازم برای کالیبره کردن فضای مورد نظر در جدول های تعبیه شده، نرم افزار ضرایب معادلات **DLT** را محاسبه و در مراحل بعدی با استفاده از این ضرایب، موقعیت هر مارکر را در فضای کالیبره شده، به صورت سه بعدی برآورد کرد.



شکل ۵. نمودار فرایند پردازش تصویر در نرم افزار MT

گفتنی است که نرم افزار **MT** از فایل‌هایی با پسوند **AVI** پشتیبانی می‌کند و داده‌های به دست آمده را می‌تواند روی فایل‌هایی با پسوند **mat** و **xls**، که مربوط به نرم افزار **Excel** است، ذخیره کند.

اعتباریابی و پایایی سنجی نرم افزار: تشخیص موقعیت یک نقطه مشخص در فضا، محاسبه طول یک شیء در حرکت های دوبعدی و سه بعدی و محاسبه کینماتیک (جابه جایی زاویه ای)، در حرکات دوبعدی و سه بعدی، پنج پروتکل مختلف این تحقیق برای اعتباریابی نرم افزار MT بود که با دوربین هایی با سرعت های متفاوت انجام گرفت. برای محاسبه طول و جابه جایی زاویه ای در حرکات دوبعدی، از دستگاه دینامومتر (Biodex S3) استفاده شد که روایی و اعتبار بالایی دارد (۱۸، ۱۹). بدین ترتیب، دستگاه روی حالت هم تنش^۱ قرار گرفت و دو مارکر با فاصله مشخص، به محور دینامومتر و انتهای بازوی آن نصب شد. سپس، از یک آزمودنی خواسته شد تا در سه نوبت پنج تکراری، دستگیره را با سرعت های مختلف حرکت دهد. نوبت اول دوربین روی سرعت ۱۲۰، نوبت دوم روی سرعت ۱۸۰ و نوبت سوم روی سرعت ۲۴۰ فریم بر ثانیه تنظیم شد. در ادامه، از حرکت مارکرها به صورت دوبعدی فیلم گرفته شد و میانگین فاصله دو مارکر و جابه جایی زاویه ای دستگیره در بازه زمان در تمام تکرارها با سرعت های مختلف دینامومتر ایزوکینتیک و سرعت های تصویربرداری متفاوت، به وسیله نرم افزار MT محاسبه شد و با داده های حاصل از متر نواری، برای فاصله دو مارکر و داده های دستگاه دینامومتر ایزوکینتیک برای جابه جایی زاویه ای، مقایسه شد (شکل ۴). گفتنی است که نرم افزار MT این قابلیت را دارد که طول اشیا و جابه جایی زاویه ای را در هر سرعتی به دست آورد، به شرط اینکه مارکرها در تصویر دیده شوند که لازمه آن، استفاده از دوربین هایی است که سرعتی متناسب با سرعت حرکت مورد نظر داشته باشند. برای اعتباریابی MT در حرکات های سه بعدی، فضایی در محل آزمایش به روش DLT کالیبره شد و تعداد چهار مارکر به مرکز توپ، قوزک خارجی مچ، کندیل خارجی زانو و برجستگی بزرگ ران یک نفر آزمودنی متصل شد. سپس از آزمودنی خواسته شد تا شش بار به توپ که در نقاط مختلف فضای کالیبره قرار گرفت و موقعیت آن در فضا به صورت دستی محاسبه شد، شوت بزند. با توجه به سرعت بالای حرکت و امکان محو و کشیده شدن مارکرها، دوربین ها روی سرعت ۲۴۰ فریم بر ثانیه ثابت شدند. در ادامه، طول ساق پا که حد فاصل دو مارکر مچ و زانو بود، با متر نواری محاسبه شد. جابه جایی زاویه ای زانو در هر شش تکرار نیز به صورت دستی و فریم به فریم در نرم افزار متلب محاسبه شد تا میانگین آن با نتایج حاصل از نرم افزار MT مقایسه شود. در ادامه، موقعیت های اولیه مارکر متصل به توپ به عنوان نقاطی ثابت، طول ساق و جابه جایی های زاویه ای مفصل زانو، در فاز روبه جلوی حرکت شوت، تا لحظه ضربه، به وسیله نرم افزار MT محاسبه شد (شکل ۶).



شکل ۶. شناسایی مارکرها در حین اجرای شوت فوتبال

تحلیل استنباطی: برای مقایسه جابه‌جایی زاویه‌ای محاسبه‌شده به وسیله نرم‌افزار و جابه‌جایی زاویه‌ای اندازه‌گیری‌شده با دینامومتر (Biodex S3)، ابتدا از آزمون کلموگراف اسمیرنوف برای بررسی هنجار بودن داده‌ها استفاده شد و سپس با توجه به هنجار نبودن داده‌ها، از آزمون غیرپارامتریک یومن ویتنی استفاده شد. همچنین، تغییرات و انحراف استاندارد طول بازوی دینامومتر در تحلیل دوبعدی، و طول ساق پا و موقعیت مارکر ثابت توپ در تحلیل سه‌بعدی محاسبه شد. برای تعیین روایی MT از ضریب همبستگی پیرسون و برای بررسی پایایی آن از ضریب همبستگی درونی ICC¹ استفاده شد.

یافته‌ها

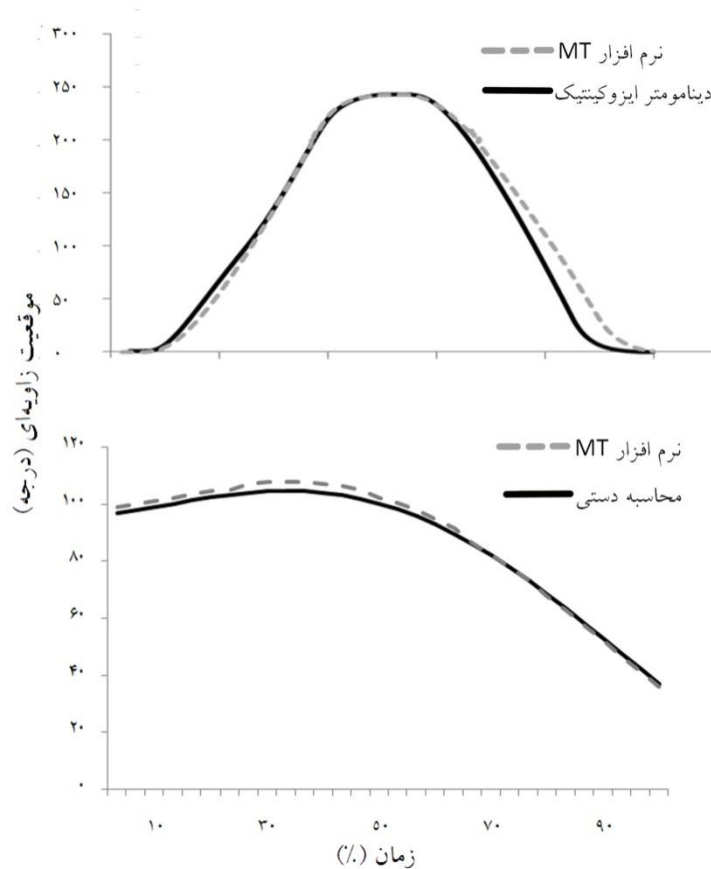
اختلاف جابه‌جایی زاویه‌ای محاسبه‌شده از طریق نرم‌افزار MT، با دینامومتر ایزوکینتیک و روش محاسبه دستی در دو روند اعتباریابی دوبعدی و سه‌بعدی، در جدول ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین مقدار محاسبه‌شده با نرم‌افزار و دو روش دیگر مشاهده نشد.

1. Intraclass Correlations

جدول ۱. بررسی اختلاف بین جابه جایی زاویه ای محاسبه شده با دینامتر و نرم افزار طراحی شده

مقدار P	نمره Z	یومن ویتنی			روش اعتباریابی
۰/۸۳۸	-۰/۲۰۴	۳۳۷۷۷	دینامومتر ایزوکینتیک	vs	نرم افزار MT
۰/۹۳۸	-۰/۰۷۸	۱۴۸۹۱۴	روش محاسبه دستی	vs	نرم افزار MT
معنی داری در سطح $P \leq 0/05$					

شکل ۷، نمودار جابه جایی زاویه ای - زمان روش اعتباریابی دوبعدی که به مقایسه جابه جایی زاویه ای محاسبه شده MT و مقدار استخراج شده از دستگاه دینامومتر ایزوکینتیک می پردازد و روش اعتباریابی سه بعدی که مقدار جابه جایی زاویه ای مفصل زانو را در فاز قبل از ضربه به شوت، توسط MT و محاسبه دستی نشان می دهد.



شکل ۷. نمودار موقعیت زاویه ای - زمان؛ مقایسه MT با دینامومتر ایزوکینتیک در تحلیل دوبعدی (بالا)، مقایسه MT با محاسبه دستی زاویه زانو در تحلیل سه بعدی (پایین)

بررسی موقعیت یک مارکر ثابت و محاسبه طول یک شیء در حین حرکت در دو حالت دوبعدی و سه بعدی، آزمون‌های دیگری بود که برای اعتباریابی نرم‌افزار MT صورت گرفت. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، حداکثر خطا در تعیین موقعیت مارکر ثابت، کمتر از ۶ میلی‌متر و حداکثر خطا در تعیین اندازه طول بازوی دینامومتر برابر ۱/۱۲ سانتی‌متر بود.

جدول ۲. انحراف استاندارد و خطای استاندارد میانگین در متغیرهای اندازه‌گیری شده

متغیر	انحراف استاندارد (cm)	خطای استاندارد میانگین
مارکر ثابت نصب شده روی توپ	۰/۵۳	۰/۰۱
طول بازوی دینامومتر حین حرکت	۱/۱۲	۰/۰۳
طول ساق پا حین شوت فوتبال	۰/۰۱	۰/۰۰۲

در جدول ۳، نتایج بررسی همبستگی اسپیرمن برای تعیین روایی MT و ضریب پایایی نرم‌افزار گزارش شده است که نشان‌دهنده دقت کافی و اعتبار پذیرفتنی نرم‌افزار است.

جدول ۳. تعیین روایی و ضریب پایایی نرم‌افزار

روش اعتباریابی	نرم‌افزار MT	VS	دینامومتر ایزوکتیک	r	مقدار P	آلفای کرونباخ	ICC
اعتباریابی دوبعدی	نرم‌افزار MT	VS	دینامومتر ایزوکتیک	۰/۹۸۱	۰/۰۰۰	۰/۹۸۴	۰/۹۷
اعتباریابی سه بعدی	نرم‌افزار MT	VS	روش محاسبه دستی	۰/۹۷۴	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲	۰/۹۹۴
معنی‌داری در سطح $P \leq 0/05$							

بحث

هدف این مطالعه طراحی، ساخت، روایی و پایایی سنجی نرم‌افزار ثبت پارامترهای کینماتیکی (جابه‌جایی، سرعت و شتاب خطی و زاویه‌ای) برای پردازش و تحلیل حرکات دوبعدی و سه بعدی بود. با وجود این که کمتر می‌توان حرکتی از انسان را یافت که تنها در یک صفحه اجرا شود، در مطالعات بی‌شماری به علت وجود محدودیت‌های مختلف، حرکات ورزشی به صورت دوبعدی بررسی شدند. در این مطالعه، برای بررسی روایی و پایایی نرم‌افزار MT، از پنج پروتکل مختلف استفاده شد که دو مورد آن در فضای دوبعدی انجام شد. همان‌طور که از نتایج تحقیق برمی‌آید، اختلاف بین پروتکل‌های بررسی شده و نرم‌افزار، معنی‌دار نبود و یافته‌های حاصل از روایی و پایایی سنجی نرم‌افزار MT نشان‌دهنده دقت مناسب این نرم‌افزار بود. گفتنی است که افزایش اختلاف و کاهش همبستگی در تحلیل دوبعدی نسبت به تحلیل سه بعدی را می‌توان ناشی از خطای کالیبراسیون دوبعدی دانست؛ زیرا در حالت دوبعدی، باید محور دوربین بر صفحه حرکت عمود باشد که کاری دشوار است و چون این خطا در تحلیل سه بعدی وجود نداشت، مشاهده شد که دقت نتایج حاصل از تحلیل سه بعدی بیشتر از تحلیل دوبعدی است. با توجه به اینکه شرکت‌های بزرگ ساخت دستگاه‌های تحلیل حرکت، مانند Vicon، Motion Analysis و Qualisys روند ساخت، برنامه‌نویسی و به‌طور کلی روش طراحی دستگاه‌ها و نرم‌افزارهایشان را در اختیار

همگان قرار نمی دهند، نمی توان مقایسه درستی بین نرم افزار حاضر، با نرم افزارهایی که از این دستگاه های پیشرفته پشتیبانی می کنند انجام داد. اما مقوله ای را که می توان درباره آن بحث کرد، قابلیت هایی است که کاربران حین اجرا و استفاده از این نرم افزارها از آن بهره می برند. بنابراین، در قسمت بحث و بررسی، ویژگی های نرم افزار MT با دیگر نرم افزارهای موجود، که با هدف اخذ پارامترهای بیومکانیکی ساخته و طراحی شده اند، مقایسه می شود.

مهم ترین عاملی که محقق را ترغیب به ساخت و طراحی نرم افزار MT کرد، هزینه بسیار زیاد استفاده از سیستم های تحلیل حرکت بود. این سیستم ها به این دلیل که به صورت بسته های کامل نرم افزاری و سخت افزاری ارائه می شوند، امکان خریداری جداگانه ندارند. همچنین، نرم افزارهای این شرکت ها، به صورت انحصاری و صرفاً برای سخت افزارهای خودشان طراحی می شوند و عملکردشان به یکدیگر وابسته است؛ بنابراین، دستیابی به آنها برای بسیاری از محققان، به خصوص در داخل کشور، سخت و همراه با هزینه های زیاد است. نرم افزار تحلیل حرکت MT برخلاف سیستم های پیشرفته موجود، با هزینه بسیار اندکی ساخته شده است و به سخت افزار خاصی نیز نیاز ندارد و این قابلیت را دارد که با انواع مختلف دوربین های ویدیویی پیوند یابد و روی کامپیوترهای شخصی نصب شود و تحلیل کینماتیکی دقیقی ارائه کند. مسئله دیگر، در استفاده از سیستم های پیشرفته تحلیل حرکت، نیاز به اختصاص فضای ثابت، دائمی و البته سرپوشیده است؛ زیرا اکثر این سیستم ها روی دیوار یا سه پایه ثابت می شوند و حرکت آنها نیازمند فرایند کالیبراسیون است. از آن مهم تر، این سیستم ها در محیط نوری تنظیم شده کار می کنند و امکان استفاده از آنها در فضای باز وجود ندارد. نرم افزار MT، چون با دوربین های ویدیویی همراه می شود، حمل شدنی است و می توان از آن در هر محیطی استفاده کرد و نیازمند فضایی ثابت در آزمایشگاه نیست. گفتنی است که به کمک نرم افزار MT و دوربین های ویدیویی، می توان حرکت ورزشکاران را حین انجام مسابقه واقعی، به صورت سه بعدی تحلیل کرد و این مزایای مهم نرم افزار حاضر است؛ زیرا بارها مشاهده شده که ورزشکاران، نتوانستند عملکردی را که در میدان واقعی مسابقه از خود نشان داده اند، در محیط آزمایشگاه نیز تکرار کنند. از دیگر مزایای نرم افزار MT، عدم نیاز آن به مارکرهای خاص، با جنس و رنگ مشخص است؛ زیرا با توجه به پنلی که در رابط گرافیکی آن طراحی شده است (شکل ۲، کادر زرد)، می تواند با هر مارکری، خود را تطبیق دهد و مختصات مارکر مورد نظر را در تصویر پیدا کند.

در سال های اخیر نرم افزارهایی برای پشتیبانی از تصاویر ویدیویی ساخته شده است که از آن جمله می توان کینووا^۱، کوئنتیک^۲ و کوالیسیس^۳ را نام برد. در این نرم افزارها برای یافتن مختصات مارکرها، بایست به صورت دستی و فریم به فریم روی مارکرها کلیک کرد، که عملی دشوار و بسیار وقت گیر است و معمولاً برای تحلیل حرکات به صورت دوبعدی به کار می رود. البته برخی از این نرم افزارها دارای حالت اتوماتیک هستند که نیازمند

1. Kinovea

2. Quintic

3. Qualisys

فیلم‌هایی با سرعت و کیفیت بسیار بالا، برای شناسایی موقعیت مارکرها است که البته باهم با خطاهایی همراه است و احتمال دارد تعدادی از مارکرها را نادیده بگیرد و فرایند تحلیل حرکت را با مشکل روبه‌رو کند. در مقابل، نرم‌افزار MT به کمک پنل‌های تعیین قلمرو (شکل ۴، کادر قرمز) و رنگ مارکر (شکل ۲، کادر زرد)، قادر است مختصات مارکرهای تغییرشکل داده‌شده که حاصل تصویربرداری با دوربین‌های نه‌چندان سرعت بالا و ارزان‌قیمت است، نیز محاسبه کند و به صورت خودکار، تصاویر را فریم به فریم، جست‌وجو کند و پس از انجام فرایند DLT، موقعیت سه‌بعدی مارکرها و در نهایت کینماتیک حرکت را در زمان بسیار اندکی به عنوان خروجی در دو صورت `mat` و `xls` ارائه دهد. از آنجایی که MT در نرم‌افزار متلب برنامه‌نویسی شده است، اطلاعات خروجی آن به راحتی در این نرم‌افزار تحلیل می‌شود. از آن جهت که کینماتیک حرکت معمولاً با هدف محاسبه کینتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله قابلیت‌های نرم‌افزار MT، محاسبه کینتیک حرکت است که از روش دینامیک معکوس و به کمک مدل‌سازی ریاضیاتی و بدون نیاز به اطلاعات صفحه نیرو محاسبه می‌شود. قابلیت‌هایی که در دیگر نرم‌افزارهای تحلیل ویدیوی مشابه دیده نشده است. نسخه اولیه این نرم‌افزار (MT version 1.1) از دو دوربین پشتیبانی می‌کند؛ اما در نسخه‌های بعدی، تعداد ورودی دوربین‌ها افزایش خواهد یافت تا احتمال پنهان ماندن مارکرها در حرکات پیچیده به حداقل برسد. همچنین، پنلی نیز برای ورودی اطلاعات مربوط به صفحه نیرو بدان اضافه خواهد شد تا نیروها و گشتاورهای ایجادشده در مفاصل و اندام‌ها با دقت بیشتری نسبت به فرایند مدل‌سازی ریاضیاتی محاسبه شود. بهبود و افزایش ابزار نرم‌افزار MT، جهت سهولت کار و ارتقای کارایی نرم‌افزار و همچنین پردازش تصاویر به‌طور هم‌زمان با اخذ تصاویر توسط دوربین‌ها از دیگر اهداف آینده، جهت توسعه MT است.

نتیجه‌گیری

در نهایت، باید گفت گسترش و ارتقای نرم‌افزارهایی مانند MT، با توجه به قابلیت‌هایی که دارد، می‌تواند محققان بیومکانیک ورزش را در استفاده از دوربین‌های ویدیویی به جای سیستم‌های پیشرفته تحلیل حرکت تشویق کند تا با هزینه‌ای کمتر و دسترسی آسان‌تر، تحلیل بیومکانیکی خود را با همان کیفیت انجام دهند.

منابع

1. Yeasin, M., Chaudhuri, S. (2000). Development of an automated image processing system for kinematic analysis of human gait. *Real-Time Imaging*. 6(1): 55-67.
2. Richards, J.G. (1999). The measurement of human motion: a comparison of commercially available systems. *Human Movement Science*. 18(5): 589-602.
3. Crosbie, J., Vachalathiti, R., Smith, R. (1997). Patterns of spinal motion during walking. *Gait & Posture*. 5(1): 6-12.
4. Winter, D.A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*: John Wiley and Sons Inc. 45-82.
5. Roetenberg, D. (2006). *Inertial and magnetic sensing of human motion*. University of Twente. 19-39.
6. O'Donovan, K.J., Kamnik, R., O'Keeffe, D.T., Lyons, G.M. (2007). An inertial and magnetic sensor based technique for joint angle measurement. *Journal of Biomechanics*. 40(12): 2604-11.
7. Zhu, R., Zhou, Z. (2004). A real-time articulated human motion tracking using tri-axis inertial/magnetic sensors package. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*. 12(2): 295-302.

8. Pellegrini, A., Tonino, P., Paladini, P., Cutti, A., Ceccarelli, F., Porcellini, G. (2013). Motion analysis assessment of alterations in the scapulo-humeral rhythm after throwing in baseball pitchers. *Musculoskeletal Surgery*. 97(1): 1-5.
9. Ha, T.H., Saber-Sheikh, K., Moore, A.P., Jones, M.P. (2013). Measurement of lumbar spine range of movement and coupled motion using inertial sensors—A protocol validity study. *Manual Therapy*. 18(1): 87-91.
10. Olsen, E., Haubro Andersen, P., Pfau, T. (2012). Accuracy and precision of equine gait event detection during walking with limb and trunk mounted inertial sensors. *Sensors*. 12(6): 8145-56.
11. Chang, I., Huang, C.L. (2000). The model-based human body motion analysis system. *Image and Vision Computing*. 18(14): 1067-83.
12. Fua, P., Gruen, A., D Apuzzo, N., Plankers, R. (2002). Markerless full body shape and motion capture from video sequences. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 34(5): 256-61.
13. Molet, T., Boulic, R., Thalmann, D. (1996). A real time anatomical converter for human motion capture. In *Computer Animation and Simulation*. Springer Vienna. 79-94.
14. Mosqueda, T., James, M.A., Petuskey, K., Bagley, A., Abdala, E., Rab, G. (2004). Kinematic assessment of the upper extremity in brachial plexus birth palsy. *Journal of Pediatric Orthopaedics*. 24(6): 695-9.
15. Anderson, F.C., Goldberg, S.R., Pandy, M.G., Delp, S.L. (2004). Contributions of muscle forces and toe-off kinematics to peak knee flexion during the swing phase of normal gait: an induced position analysis. *Journal of Biomechanics*. 37(5): 731-7.
16. Fleisig, G., Nicholls, R., Elliott, B., Escamilla, R. (2003). Tennis: Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Journal of Sports Biomechanics*. 2(1): 51-64.
17. Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator co-ordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In *American Society of Photogrammetry Symposium on Close Range Photogrammetry*. Falls Church.
18. Drouin, J.M., Valovich-mcLeod, T.C., Shultz, S.J., Gansneder, B.M., Perrin, D.H. (2004). Reliability and validity of the Biodex system 3 pro isokinetic dynamometer velocity, torque and position measurements. *European Journal of Applied Physiology*. 91(1): 22-9.
19. Taylor, N.A., Sanders, R.H., Howick, E.I., Stanley, S.N. (1991). Static and dynamic assessment of the Biodex dynamometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 62(3): 180-8.